

TUGAS AKHIR - TM 141585

SIMULASI DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIR GAP* PADA TORSI *PSEUDO DIRECT-DRIVE* MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT SOFTWARE*

Ikhtiar Adhi Nugroho
NRP 02111645000022

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM 141585

SIMULASI DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIR GAP* PADA TORSI *PSEUDO DIRECT-DRIVE* MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT SOFTWARE*

Ikhtiar Adhi Nugroho
NRP 02111645000022

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM 141585

SIMULATION AND ANALYSIS EFFECT OF AIR GAP VARIATION ON *PSEUDO DIRECT-DRIVE* TORQUE USING *FINITE ELEMENT SOFTWARE*

Ikhtiar Adhi Nugroho
NRP 02111645000022

Dosen Pembimbing
Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**SIMULASI DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI
AIR GAP PADA TORSI PSEUDO DIRECT-DRIVE
MENGUNAKAN FINITE ELEMENT SOFTWARE**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

IKHTIAR ADHI NUGROHO

NRP. 021116 45 000022

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Julendra B. Ariandita, M.Eng. (Penabimbing)
NIP. 196807061990031004
2. Dr. Ir. Agus Saigis Pramono, DE. (Penguji I)
NIP. 196508101990021004
3. Ir. Yusuf Kaelana, MSc. (Penguji II)
NIP. 196511031990021004
4. Dr. Ir. M. Nur Yuniarta, PhD. (Penguji III)
NIP. 197506301998021004

SURABAYA

JULI 2018

Simulasi Dan Analisis Pengaruh Variasi *Air Gap* Pada Torsi *Pseudo Direct-Drive* Menggunakan *Finite Element Software*

Nama : Ikhtiar Adhi Nugroho
NRP : 02111645000022
Jurusan / Fakultas : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Julendra Bambang Ariatedja,
MT.

ABSTRAK

Pseudo Direct-Drive (PDD) merupakan evolusi dari sistem transmisi putaran dan torsi non-kontak (*magnetic gear*) dengan kemampuan layaknya sistem CVT atau *automatic transmission*. Sistem ini mengintegrasikan *magnetic planetary gear* (*coaxial magnetic gear*) dengan *brushless permanent magnet machine* (*synchronous machines*). *Pseudo Direct-Drive* menjadi salah satu pilihan di masa depan untuk kebutuhan transfer putaran dan torsi dengan kemampuan penyesuaian rasio *input-output* yang reliabel, memiliki tingkat perawatan yang rendah, dan desain yang *compact* untuk optimalisasi ruang.

Penelitian dengan metode simulasi *finite element software* akan menganalisis pengaruh *air gap* dengan mengubah geometri desain yang tetap mempertahankan ketebalan permanent magnet dan komponen feromagnetik. Besar torsi *output Pseudo Direct-Drive* akan menjadi parameter yang menjadi tolak ukur. Penelitian menggunakan konfigurasi *air gap* 0.5 mm, 1 mm dan 1.5 mm. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa memperkecil celah udara / *air gap* antar pole dapat meningkatkan torsi *output*. Berdasarkan analisis hasil simulasi, torsi *output* pada konfigurasi *air gap* 0.5 mm, 1 mm, dan 1.5 mm masing-masing adalah 109.84 Nm, 81.55 Nm, dan 60.05 Nm.

Kata Kunci : Torsi, PDD, CVT, *air gap*, *finite element*

Simulation And Analysis Effect Of Air Gap Variation On Pseudo Direct-Drive Torque Using Finite Element Software

Student Name : Ikhtiar Adhi Nugroho
NRP : 02111645000022
Major : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor : Ir. Julendra Bambang Ariatedja,
MT.

Pseudo Direct-Drive (PDD) is an evolution of the transmission system of rotation and non-contact torque (magnetic gear) with the ability of a CVT or automatic transmission system. This system integrates a magnetic planetary gear (coaxial magnetic gear) with a brushless permanent magnet machine (synchronous machines). Pseudo Direct-Drive becomes one of the future options for torque transfer needs with reliable input-output, ratio adjustment capability, low maintenance level, and compact design for space optimization.

Research by finite element simulation method will analyze the influence of air gap by changing the design geometry while maintaining permanent thickness of magnet and ferromagnetic component. Pseudo Direct-Drive output torque will be the parameter that becomes the benchmark. The study used air gaps configuration of 0.5 mm, 1 mm and 1.5 mm. The results showed that minimizing air gaps between poles can increase the output torque. Based on the simulation results analysis, the output torque on the 0.5 mm, 1 mm, and 1.5 mm

water gap configuration are 109.84 Nm, 81.55 Nm, and 60.05 Nm, respectively.

Keywords: Torque, PDD, CVT, air gap, finite element

KATA PERNGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan penuh syukur penulis mengucapkan “Alhamdulillillah” atas segala kenikmatan yang telah diberikah Allah swt sehingga tugas akhir dengan judul “Analisis dan Simulasi Pengaruh Variasi *Air Gap* Pada Torsi *Pseudo Direct-Drive* Menggunakan *Finite Element Software*” dapat selesai sesuai dengan harapan penulis. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Keluarga besar di rumah yang selalu memberikan dukungan, dan doa kepada saya.
2. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT. selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberikan masukan dan saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Eng,Sc., Ph.D selaku ketua jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
4. Seluruh civitas akademika Jurusan Teknik Mesin yang telah membantu dalam kelancaran perjalanan menuntut ilmu.
5. Seluruh teman-teman yang tergabung dalam grup Kabinet Komting yang menjadi tempat bertukar ilmu selama masa perkuliahan.
6. Seluruh angkatan LJ 2016 yang selalu kompak dalam membagi informasi berkaitan dengan perkuliahan atau non-teknis lain.

Akhir kata penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Saya meminta maaf apabila dalam tugas akhir ini masih ditemui banyak kesalahan. Kritik dan saran yang membangun penulis harapkan agar dapat memperbaiki diri kembali.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
KATA PERNGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xvii

BAB

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Permanen Magnet.....	7
2.2.1 Permanen Magnet Alnico.....	8
2.2.2 Permanen Magnet Ferrites.....	8
2.2.3 Permanen Magnet Rare Earth.....	8
2.2 Mechanical Planetary Gear.....	10
2.3.1 Prinsip Kerja Planetary Gears.....	12
2.3.2 Rasio Transmisi Planetary Gear Set.....	16
2.3.3 Rasio Epicyclic Gear Train.....	18

2.3.4 Komponen Gaya Planetary Gear.....	22
2.3 Magnetic Planetary Gear (Coaxial Magnetic Gear).....	23
2.4.1 Torsi Magnetic Gear.....	24
2.4.2 Dasar Magnetic Gear.....	27
2.4.3 Rasio Planetary Magnetic Gear.....	28
2.4 Pseudo Direct-Drive Technology (MAGSPLIT).....	31
2.5 Finite Element Metode.....	33
2.6.1 Software Analisis.....	35
2.6.2 Formulasi Finite Element Maxwell.....	35

BAB III

METODOLOGI

3.2 Variabel Penelitian.....	40
3.2.1 Variabel Bebas.....	40
3.2.2 Variabel Tetap.....	40
3.3 Desain Penelitian.....	41
3.3.1 Desain Adjust-Speed Synchronous Machine.....	43
3.4 Metode Analisa Software Finite Element Pada Magnetic Planetary Gear.....	44
3.4.1 Pre-Processing.....	45
3.4.2 Processing.....	48
3.5 Metode Analisis Software Finite Element Pada Pseudo Direct-Drive / PDD.....	49
3.5.2 Proses Simulasi Pseudo Direct-Drive (PDD) Pada 2D Transient.....	50
3.5 Detail Langkah Penelitian.....	51

BAB IV

PEMBAHASAN.....	56
4.1 Hasil Simulasi Magnetic Planetary Gear.....	56
4.1.1 Hasil Verifikasi Simulasi 3D Magnetostatic Magnetic Panetary Gear.....	60
4.1.2 Hasil Verifikasi Simulasi 2D Transient Magnetic Panetary Gear.....	62
4.1.3 Analisis Hasil Simulasi Magnetic Planetary Gear.....	64
4.2 Hasil Simulasi Pseudo Direct-Drive / PDD.....	66
4.2.1 Verifikasi Hasil Simulasi <i>Pseudo Direct-Drive</i> , Air Gap 1 mm.....	68
4.3 Hasil Simulasi Pseudo Direct-Drive / PDD Dengan Variasi Air Gap.....	70
4.3.1 Hasil Simulasi <i>Pseudo Direct-Drive</i> / PDD Dengan Air Gap 0.5 mm, dan 1.5 mm.....	71
4.4 Analisis Hasil Simulasi <i>Pseudo Direct-Drive</i> / PDD.....	72

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran.....	81
DAFTAR PUTSAKA.....	83
LAMPIRAN.....	87

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 2 Desain dan Hasil Peneliti K. Atallah (2008) [2]..	5
Gambar 2. 3 Desain dan Hasil Peneliti S.L. Ho, Shuangxia Niu (2011) [3]	6
Gambar 2. 4 Desain dan Hasil Peneliti L. Jian (2009) [4]	7
Gambar 2. 5. Penggunaan permanen magnet [6]	10
Gambar 2. 6. Diagram kinematik <i>planetary gear</i> sederhana [7]	11
Gambar 2. 7. <i>Planetary gear set</i> [7]	12
Gambar 2. 8. Komponen <i>planetary gear set</i> [7]	12
Gambar 2. 9. Mekanisme perlambatan <i>panetary gear set</i> [8]	14
Gambar 2. 10. Mekanisme percepatan <i>panetary gear set</i> [8]	15
Gambar 2. 11. Mekanisme Perubahan arah <i>putaran input-output planetary gear set</i> [8]	15
Gambar 2. 12. Diagram kinematik <i>panetary gear set</i> [9]	16
Gambar 2. 13 Mekanisme <i>2 stage planetary gear, brake 1</i> aktif	19
Gambar 2. 14 Mekanisme <i>2 stage planetary gear, brake 2</i> aktif	20
Gambar 2. 15. Geometri dasar roda gigi [10]	22
Gambar 2. 16. Komponen gaya pada roda gigi [10]	23
Gambar 2. 17. Konfigurasi <i>magnetic planetary gear set</i> [11].	24
Gambar 2. 18. Perbandingan <i>magnetic planetary gear</i> dan <i>mecanical planetary gear</i> [13]	27
Gambar 2. 19 Karakteristik torsi pada <i>magnetic gear</i> [13]....	28
Gambar 2. 20. <i>Magnetic planetary gear set</i> dengan variasi <i>input-output</i> dan komponen yang ditahan. [13].	29
Gambar 2. 21. Komponen <i>Pseudo Direct-Drive (PDD) / MAGSPLIT®</i>	32

Gambar 2. 22. Proses <i>meshing</i>	34
Gambar 2. 23 Ilustrasi model <i>mesh</i> 3D	37
Gambar 3. 1. Desain <i>Pseudo Direct-Drive</i>	41
Gambar 3. 2. Desain <i>magnetic planetary gear</i> [14].....	43
Gambar 3. 3 Desain dan spesifikasi <i>adjust-speed synchronous machine</i>	44
Gambar 3. 4 <i>Mesh</i> 3D tetrahedra.....	46
Gambar 3. 5 Area Operasi.....	46
Gambar 3. 6. Hasil Pengujian <i>convergence</i>	48
Gambar 3. 7. Hasil Pengujian <i>magnetic planetary gear</i>	49
Gambar 3. 8. <i>Default setting winding phase A</i>	50
Gambar 3. 9. Konfigurasi dua <i>motion setup</i> pada simulasi 2D <i>transient</i>	51
Gambar 3. 10. <i>Flowchart</i> Penelitian.....	54
Gambar 4. 1. Grafik torsi maksimum simulasi 3D <i>transient magnetic planetary gear, air gap 1 mm</i>	56
Gambar 4. 2. Grafik torsi maksimum simulasi 3D <i>transient magnetic planetary gear, air gap 0.5 mm</i>	58
Gambar 4. 3. Grafik torsi maksimum simulasi 3D <i>transient magnetic planetary gear, air gap 2 mm</i>	59
Gambar 4. 4. Hasil simulasi 3D <i>magnetostatic magnetic planetary gear, air gap 0.5 mm</i>	60
Gambar 4. 5. Hasil simulasi 3D <i>magnetostatic magnetic planetary gear, air gap 1 mm</i>	61
Gambar 4. 6. Hasil simulasi 3D <i>magnetostatic magnetic planetary gear, air gap 2 mm</i>	62
Gambar 4. 7. Grafik torsi maksimum simulasi 2D <i>transient magnetic planetary gear, air gap 1 mm</i>	63
Gambar 4. 8. Grafik torsi maksimum simulasi 2D <i>transient magnetic planetary gear, air gap 0.5 mm</i>	64
Gambar 4. 9. Grafik torsi maksimum simulasi 2D <i>transient magnetic planetary gear, air gap 2 mm</i>	64

Gambar 4. 10. <i>Motion setup 2D transient Pseudo Direct-Drive</i>	67
Gambar 4. 11. Grafik torsi simulasi <i>2D transient Pseudo Direct-Drive, air gap 1 mm</i>	68
Gambar 4. 12. Grafik torsi maksimum <i>magnetic pametary gear, air gap 1 mm, steel segmen sebagai output</i>	69
Gambar 4. 13. Grafik torsi <i>Pseudo Direct-Drive</i> dengan <i>air gap 0.5 mm</i>	71
Gambar 4. 14. Grafik torsi <i>Pseudo Direct-Drive</i> dengan <i>air gap 1.5 mm</i>	72
Gambar 4. 15. Grafik pengaruh <i>air gap</i> terhadap torsi <i>output</i>	73
Gambar 4. 16. Data performa <i>adjust-speed synchronous machine</i> dengan <i>air gap 0.5 mm (a) dan 1 mm (b)</i>	74
Gambar 4. 17 Perbandingan <i>Efisiensi adjust-speed synchronous machine</i> dengan variasi <i>air gap</i>	75
Gambar 4. 18 Torsi rata-rata <i>synchronous machine</i> dengan <i>air gap 1 mm</i>	75
Gambar 4. 19 Torsi rata-rata <i>synchronous machine</i> dengan <i>air gap 0.5 mm</i>	76

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Perbandingan biaya relatif magnet [5].....	9
Tabel 2. 2. Properties permanen magnet komersial [6]	10
Tabel 2. 3. Variasi konfigurasi planetary gear set.....	13
Tabel 2. 4. Konfigurasi rasio planetary gear set dengan variasi input-output dan komponen yang ditahan (stationary).	18
Tabel 3. 1. Data desain <i>magnetic planetary gear</i>	42
Tabel 4. 1. Perbandingan hasil simulasi software Maxwell dengan penelitian terdahulu	57
Tabel 4. 2. Perbandingan hasil simulasi magnetic planetary gear dengan beberapa metode simulasi.....	66

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Dalam berbagai keperluan tenaga dari mesin / *mechanical power* tidak secara langsung dimanfaatkan untuk suatu keperluan, untuk itu diperlukan suatu sistem yang mampu mentransmisikan putaran dan torsi. Salah satu sistem transmisi putaran dan torsi yang sering digunakan adalah sistem roda gigi mekanik / *mechanical gears*, pemilihan ini didasarkan pada efisiensi transfer putaran dan torsi yang tinggi jika dibandingkan dengan *mechanical transmission* lain seperti *pully and belt* atau *chain sproket*. Sistem roda gigi / *mechanical gears* memiliki ragam jenis bentuk sehingga dalam penggunaanya memiliki banyak pilihan dalam *design* sesuai kebutuhan.

Sampai saat ini penggunaan *mechanical gears* menjadi pemeran utama berbagai jenis aplikasi industri dalam mentransmisikan putaran dan torsi. Peralatan mekanis ini melibatkan 2 buah cakram logam yang saling berhubungan melalui konfigurasi gigi-gigi / *gears*. Dengan terdapatnya mekanisme kontak berdampak timbulnya getaran, kebisingan, dan sejumlah kerugian / *losses* pada pentransmisian daya dari mesin / *mechanical power*, selain itu penggunaan sistem pelumas tidak dapat dihindari untuk mengurangi gesekan dan panas yang berlebih [1]. Dengan munculnya bahan permanen magnet (PM) dengan energi density yang tinggi konsep transmisi putaran dan torsi non-kontak melalui interaksi antar permanen magnet (*Magnetic gears*) mulai banyak.

dikembangkan untuk menggantikan sistem roda gigi mekanik. *Magnetic gears* mampu mengisi kekurangan yang ada pada *mechanical gears* dari segi perbaikan kebisingan, getaran, tingkat perawatan yang rendah, dan optimalisasi geometri dari sistem transmisi.

Magnetic gear telah mengalami perkembangan yang signifikan. Salah satu fokus penelitian *magnetic gear* adalah menggabungkan *magnetic planetary gear* dengan *brushless permanent magnet motor (synchronous machines)*. Beberapa Penelitian yang telah dilakukan diantaranya, K. Atallah, dkk (2008) *A Novel "Pseudo" Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine*, S.L. Ho, Shuangxia Niu dkk (2011) *Transient Analysis a Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine*, L. Jian, dkk (2009) *A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation*.

Keunggulan dari *magnetic planetary gear* yang terintegrasi *brushless permanent magnet motor (synchronous machines)* / *Pseudo Direct-Drive* adalah kemampuan dalam mengubah rasio dari *magnetic planetary gear* tanpa harus mengubah input-output, besar putaran dan torsi yang ditransmisikan pada bagian input. Teknologi ini menjadi sangat potensial pada beberapa aplikasi seperti pada *wind power generation* dan *transmission automatic* pada kendaraan yang membutuhkan *reliability*, tingkat perawatan yang rendah, dan optimalisasi ruang sistem.

Menggunakan metode elemen hingga (FEM), penelitian *Pseudo Direct-Drive* akan menggunakan desain *magnetic planetary gear* yang telah diteliti sebelumnya. Penelitian akan terfokus pada pengaruh variasi *air gap* terhadap

torsi yang ditransmisikan. Pada penelitian terdahulu pembahasan *air gap* sendiri masih belum ditekankan, sehingga hal tersebut menjadi latar belakang penelitian ini.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian yang akan dilakukan adalah :

1. Bagaimana keterkaitan pengaruh *air gap* pada pada torsi *magnetic planetary gear* sebagai komponen utama sistem *Pseudo Direct-Drive* ?
2. Apakah besar torsi yang ditransmisikan sesuai dengan landasan teori yang ada pada *Pseudo Direct-Drive* ?
3. Apakah terdapat pengaruh pada besar torsi yang ditransmisikan dengan memvariasikan celah udara / *air gap* pada desain *Pseudo Direct-Drive* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh variasi *air gap* pada *magnetic planetary gear* yang merupakan komponen utama sistem *Pseudo Direct-Drive*, dengan simulasi terpisah dari sistem utama.
2. Mengetahui kesesuaian besar transmisi torsi melalui analisis dan simulasi *software* pada *Pseudo Direct-Drive*.
3. Mengetahui pengaruh jarak celah udara / *air gap* pada *Pseudo Direct-Drive* terhadap torsi yang ditransmisikan.

1.4 Batasan Masalah

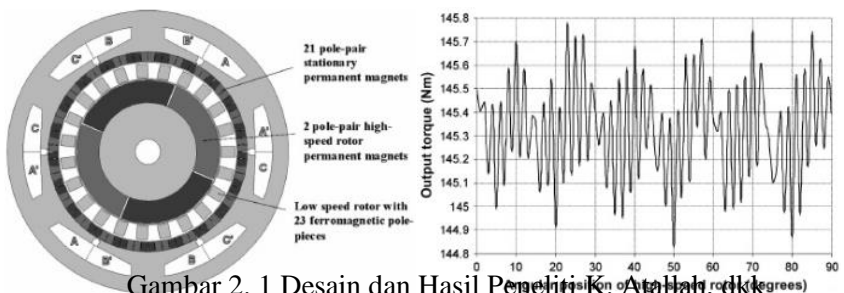
Adapun batasan-batasan dalam penelitian ini, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Permanen magnet yang digunakan adalah NdFeB 30 dengan tebal 6 mm.
2. Desain *Pseudo Direct-Drive* menggunakan desain awal *magnetic planetary gear* yang telah diteliti sebelumnya.
3. Analisa torsi *Pseudo Direct-Drive* menggunakan *finite element software*.
4. *Input* putaran adalah 1000 rpm.
5. Kecepatan putar pada *brushless permanent magnet motor* (*synchronous machines*) dijaga tetap pada 500 rpm.
6. Daya output *brushless permanent magnet motor* (*synchronous machines*) pada 1kW.
7. Desain *brushless permanent magnet motor* adalah motor 3 fasa tipe Y3 dengan jumlah slot *copper winding* sebanyak 42 slot.
8. Variasi *air gap* adalah 0.5 mm, 1 mm dan 2 mm pada pengujian pengujian *magnetic planetary gear*.
9. Variasi *air gap* adalah 0.5 mm hingga 1.50 mm dengan kelipatan 0.18 mm tiap pengujian *Pseudo Direct-Drive*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

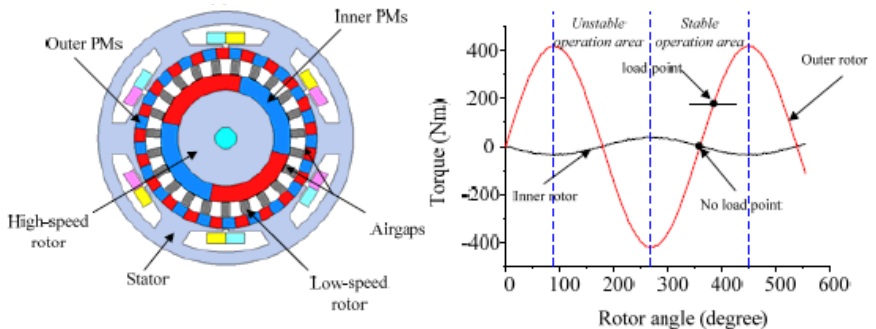
2.1 Penelitian Terdahulu

Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet merupakan objek penelitian magnetic gear yang menjadi fokus pada beberapa penelitian. Tipe magnetic gear ini menjadi banyak perhatian dikarenakan kemampuan transfer putaran dan torsi lebih sederhana jika dibandingkan dengan *automatic transmission*. Penelitian yang dilakukan K. Atallah, dkk (2008) *A Novel “Pseudo” Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine* [2] melakukan pembahasan yang berkaitan uji coba desain *low speed electrical machine*. Pada penelitian tersebut pendekatan yang dilakukan adalah dengan analisa *software* dan eksperimen. Hasil yang diperoleh adalah torsi density pada 60 kN/m³ dengan torsi maksimal pada 145.75 Nm dengan desain *magnetic gear* pada gambar 2.1 Masih pada desain yang sama, penelitian lain dari K. Atallah, dkk adalah *Influence of Control Structures and Load Parameters on Performance op a Pseudo Direct Drive* pada tahun 2014.



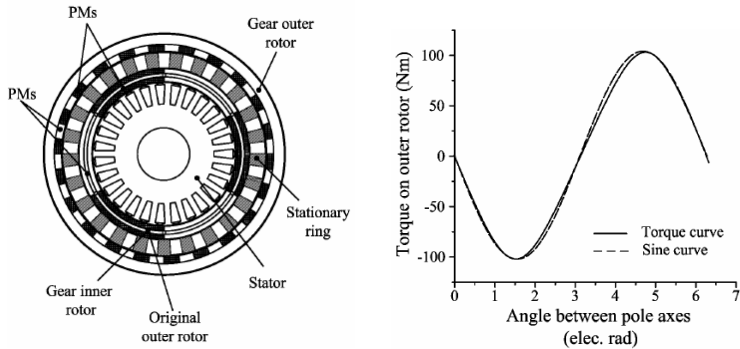
Gambar 2. 1 Desain dan Hasil Penelitian K. Atallah, dkk (2008) [2]

Penelitian yang dilakukan S.L. Ho, Shuangxia Niu dkk (2011), *Transient Analysis a Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine* [3]. Metode penelitian yang digunakan adalah metode simulasi software. Penelitian tersebut melakukan analisis desain *Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine* menghasilkan torsi maksimum pada low-speed rotor 400 Nm dan torsi *copper winding* 17.5 Nm dengan input putaran 3000 Rpm pada desain gambar



Gambar 2. 2 Desain dan Hasil Peneliti S.L. Ho, Shuangxia Niu dkk (2011) [3]

L. Jian, dkk (2009) *A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation* [4], pada penelitian tersebut desain *Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine* pada kebanyakan penelitian diubah sesuai kebutuhan dari *Wind Power Generation*. Desain tersebut menmpatkan *control rotor* pada bagian *inner rotor* dengan masukan *input* putaran pada 1000 rpm menghasilkan torsi 14.24 Nm dan torsi *output* pada *outer rotor* sebesar 103.42 Nm.



Gambar 2. 3 Desain dan Hasil Peneliti L. Jian, dkk (2009) [4]

Kesimpulan dari ketiga hasil penelitian diatas adalah penelitian saat ini masih mengembangkan desain dari sisi geometri dan konfigurasi *magnetic gear*. Berdasar pada hasil penelitian-penelitian tersebut, pada penelitian ini fokus penelitian pada variasi *air gap* yang diaplikasikan pada desain *Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine* sederhana. Analisis yang akan dilakukan adalah dengan melakukan simulasi perubahan *air gap* pada software *Maxwell* untuk melihat pengaruhnya pada torsi yang ditransmisikan.

2.2 Permanen Magnet

Pengembangan *magnetic gears* tidak lepas dari penggunaan permanen magnet, penggolongan permanen magnet sendiri didasarkan pada jenis materialnya. Jenis material dari permanen magnet akan sangat mempengaruhi propertis dari permanen magnet tersebut, dengan demikian berpengaruh pada tingkat efektifitas transfer putaran dan torsi dari sistem roda gigi magnet / *magnetic gears* [5].

2.2.1 Permanen Magnet Alnico

Keunggulan utama permanen magnet Alnico memiliki koefisien temperatur yang rendah, koefisien temperatur berkisar pada -0.02% per $^{\circ}\text{C}$ sampai 520°C . Permanen magnet Alnico terdiri dari unsur Al (*Aluminium*), Ni (*Nickel*), Co (*Cobalt*), Fe (*Iron*), kelemahan permanen magnet jenis ini adalah *magnetic force* dan *energy density* $(BH)_{\max}$ yang rendah. Permanen magnet Alnico mendominasi pasar PM DC motor pada tahun 1940 hingga 1960 sebelum digantikan permanen magnet bahan *ferrits*.

2.2.2 Permanen Magnet Ferrites

Berium dan *strontium ferrite* mulai dikembangkan tahun 1950. *Ferrite* memiliki gaya magnet yang lebih tinggi dari alnico, namun *magnetic flux density* masih rendah untuk aplikasi permanen magnet DC motor saat itu yang mulai berkembang. Magnet tipe *ferrite* berbahan dasar *berium ferrite*, $\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ dan *strontium ferrite* $\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_2$ dengan metode pembuatan melalui *powder metallurgi*. Saat ini permanen magnet *ferrite* lebih banyak digunakan pada DC motor kecil.

2.2.3 Permanen Magnet Rare Earth

Tiga dekade terakhir pengembangan permanen magnet menghasilkan permanen magnet dengan *energy density* $(BH)_{\max}$ yang tinggi dari material *rare earth*. Material *rare earth* pada dasarnya adalah senyawa campuran, generasi pertama PM *rare earth* adalah senyawa SmCo_5 (*Samarium-Cobalt*) yang memiliki gaya magnet dan *magnetic flux density* yang tinggi. Kelemahan permanen magnet ini adalah biaya produksi yang tinggi dari unsur pembentuknya Sm dan Co. Generasi kedua

PM *rare earth* berbasis pada Nd (*Neodymium*) dengan harga yang lebih murah dari Sm dan Co. Pengembangan PM *rare earth* mulai dikembangkan oleh Sumitomo *Special Material*, Japan dan pada tahun 1983 diperkenalkan ke publik melalui acara tahunan ke 29 *Annual Conference of Magnetism and Magnetic Material*, U.S.A. Magnet NdFeB merupakan pilihan potensial untuk meningkatkan performa dengan pertimbangan biaya pada banyak aplikasi permanen magnet, hal ini didasarkan pada *propertis* dari NdFeB magnet yang lebih baik dari SmCo₅ dengan harga yang lebih terjangkau.

Tabel 2. 1. Perbandingan biaya relatif magnet [5]

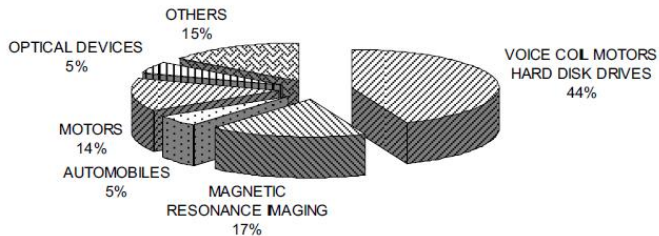
Type	BH _{max}	\$/kg	\$/BH _{max}
Alnico 9	5	20 \$	4 \$
SmCo	25	70 \$	2.8 \$
NdFeB	40	35 \$	0.88 \$

J.M.D. Coey, pada tahun 2002 menerbitkan *journal* berkaitan dengan aplikasi permanen magnet [6]. Dalam *journal* tersebut salah satu pembahasan berkaitan dengan karakteristik permanen magnet. Penggunaan permanen magnet digolongkan pada dua kategori kerja yaitu statis atau dinamis. Penggunaan pada aplikasi dinamis membutuhkan *energy density* (BH)_{max} dan *remanent magnetic flux density* (B_r) yang tinggi, karakteristik tipe permanen magnet komersial dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2. *Properties* permanen magnet komersial [6]

	B_r (T)	J_s (T)	iH_c (kA m ⁻¹)	BH_c (kA m ⁻¹)	$(BH)_{max}$ (kJ m ⁻³)
SrFe ₁₂ O ₁₉	0.41	0.47	275	265	34
Alnico	1.25	1.40	54	52	43
SmCo ₅	0.88	0.95	1700	660	150
Sm ₂ Co ₁₇ *	1.08	1.15	800	800	220
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.28	1.54	1000	900	300

Secara garis besar penggunaan permanen magnet untuk keperluan komersial dapat dilihat pada gambar 2.4 Permanen magnet *ferrites* mendominasi pasar sebesar 55%, *rare earth* 35% dan sisanya adalah alnico. Dari gambar 2.1 terlihat bahwa aplikasi utama permanet magnet *ferrites* lebih banyak digunakan untuk *voice coil* dan *hard disc driver*, dan penggunaan terbesar permanaen magnet *rare earth* adalah pada bidang automotif dan motor.

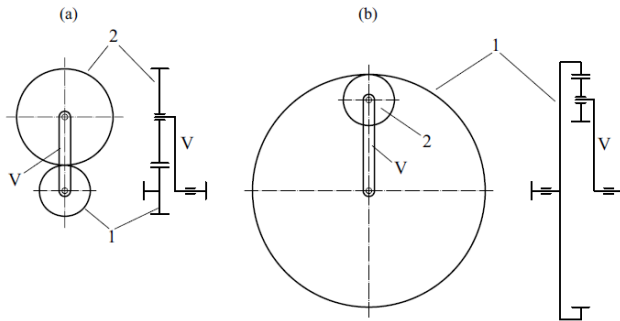


Gambar 2. 4. Penggunaan permanen magnet [6]

2.2 Mechanical Planetary Gear

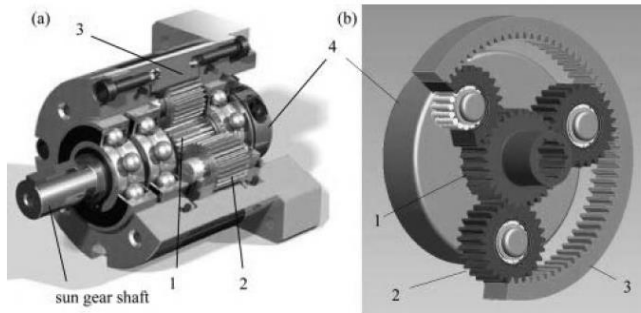
Mekanisme roda gigi dengan transfer putaran dan torsi dalam satu sumbu kerja arah axial (*axial transmission*) lebih dikanal sebagai mekanisme *planetary gear*. Mekanisme dari *planetary gear* yang paling sederhana dapat dilihat pada gambar

2.5, dalam gambar 2.5 tersebut roda gigi *output* dihubungkan dengan batang penghubung (V). Putaran pada roda gigi 1 diteruskan ke roda gigi 2 yang menyebabkan dua gerak pada roda gigi 2, gerakan yang pertama roda gigi 2 berputar pada porosnya dan kedua adalah gerakan roda gigi 2 bersama pembawa mengelilingi gida gigi 1. Hasil transmisi putaran tersebut akan menjadi sumbu kerja dengan input melalui perantara batang penghubung (V).



Gambar 2. 5. Diagram kinematik *planetary gear* sederhana [7]

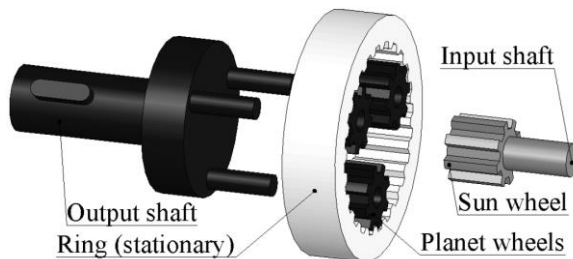
Untuk merubah perbandingan gigi yang berkaitan dengan perubahan kecepatan atau torsi, dan perubahan arah dari kecepatan putar *input-output*, *planetary gear* pada gambar 2.5 (a) dan (b) digabungkan menjadi sistem *planetary gear* seperti pada gambar 2.6. Putaran yang masuk ke *sun gear shaft* yang terhubung langsung dengan *sun gear* (1) ditransmisikan ke *ring gear* (3) sebagai output melalui roda gigi planet (2).



Gambar 2. 6. *Planetary gear set* [7]

2.3.1 Prinsip Kerja Planetary Gears

Planetary gear set akan memiliki 2 derajat kebebasan (2-DOF), jika terdapat dua *input* untuk menghasilkan satu *output*. Sistem *planetary gear* akan berubah menjadi 1-DOF jika salah satu dari tiga komponen *sun gear*, *planet gear-carrier*, dan *ring gear* ditahan. Pada gambar 2.7 mengilustrasikan ketika sistem *planetary gear* dengan komponen *ring gear* ditahan (*stationary*). Pada gambar tersebut transmisi dari *input shaft* yang terhubung ke *sun gear* diteruskan ke *planet gear* untuk menggerakkan *output shaft*.



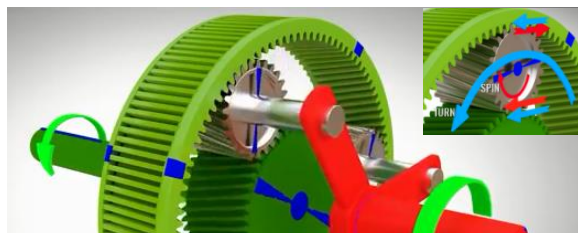
Gambar 2. 7. Komponen *planetary gear set* [7]

Tabel berikut menunjukkan konfigurasi dari *planetary gear* dengan variasi *input-output* dan komponen yang dibuat diam (*stationary*). Dari tabel 2.3 menunjukkan tiga kemampuan *planetary gear* dalam meningkatkan atau mereduksi putaran dan torsi, serta kemampuan dalam mengubah arah (*direction*) *input-output*.

Tabel 2. 3. Variasi konfigurasi *planetary gear set*

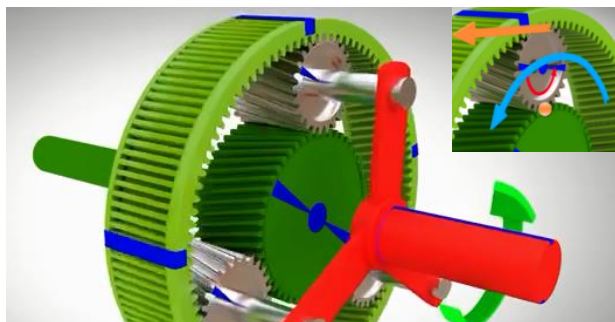
no	Sun Gear	Carrier	Ring Gear	Speed	Torque	Direction
1	Input	Output	Ditahan	Reduksi Maksimum	Meningkat	Sama dengan input
2	Ditahan	Output	Input	Reduksi Minimum	Meningkat	Sama dengan input
3	Output	Input	Ditahan	Kenaikan Maksimum	Reduksi	Sama dengan input
4	Ditahan	Input	Output	Kenaikan Maksimum	Reduksi	Sama dengan input
5	Input	Ditahan	Output	Reduksi	Meningkat	Kebalikan dari input
6	Output	Ditahan	Input	Peningkatan	Reduksi	Kebalikan dari input
7	Bila dua komponen ditahan, kecepatan dan arah sama dengan input. Rasio 1:1					
8	Bila tidak ada komponen yang ditahan, tidak terjadi transmisi putaran dan torsi. Kondisi netral					

Mekanisme dari perubahan kecepatan dan torsi dalam hal ini adalah mekanisme reduksi dapat dilihat pada gambar 2.8. Konfigurasi perlambatan terjadi jika *ring gear* ditahan (*stationary*), *sun gear* bergerak sebagai *input* putaran, dan *carrier* yang terhubung dengan *planet gear* sebagai *output*. Hal ini dapat terjadi jika *planet gear* berputar pada sumbu putarnya dan bergerak mengelilingi *sun gear* (*carrier* tidak ditahan), dengan demikian vektor kecepatan pada titik *sun gear* dan *planet gear* bertemu adalah penjumlahan vektor kecepatan putaran *planet gear* pada sumbu kerjanya dan vektor kecepatan *planet gear* saat bergerak terhadap *sun gear*. Pada titik diantara *planet* dan *ring gear* vektor kecepatan bernilai nol akibat vektor kecepatan putar *planet gear* berlawanan dengan vektor gerak *planet gear* terhadap *sun gear*.



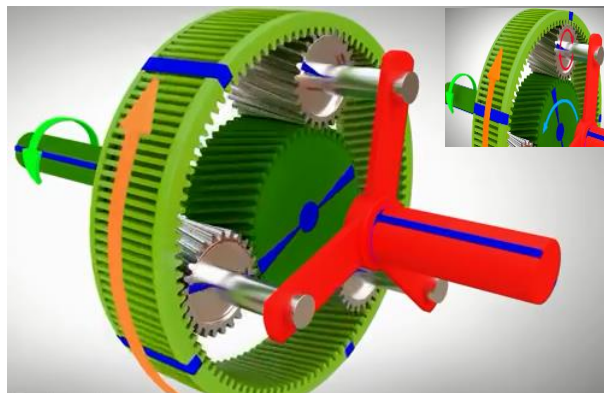
Gambar 2. 8. Mekanisme perlambatan *panetary gear set* [8]

Mekanisme peningkatan kecepatan dari *planetari gear set* dapat dilihat pada gambar 2.9 pada konfigurasi ini posisi *sun gear* sebagai *stationary*, *ring gear* sebagai *input*, dan *planet gear-carrier* sebagai *output*. Pada dasarnya pergerakan dari rangkaian ini sama dengan rangkaian untuk mengurangi kecepatan. Ketika *ring gear* berputar searah jarum jam maka putaran dari *planet gear-carrier* akan sama dengan putaran dari *ring gear* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9, dengan demikian vektor kecepatan maksimum berada pada posisi antara *ring gear* dan *planet gear* sedangkan pada titik *planet gear* dan *sun gear* vektor kecepatan bernilai nol. Dengan mengalikan kecepatan putar (ω) terhadap jarak dari sumbu pusat putaran (r) ke titik maksimum kecepatan untuk memperoleh nilai kecepatan (v), maka pada konfigurasi gambar 2.9 nilai kecepatan pada titik maksimumnya lebih besar dari konfigurasi gambar 2.8.



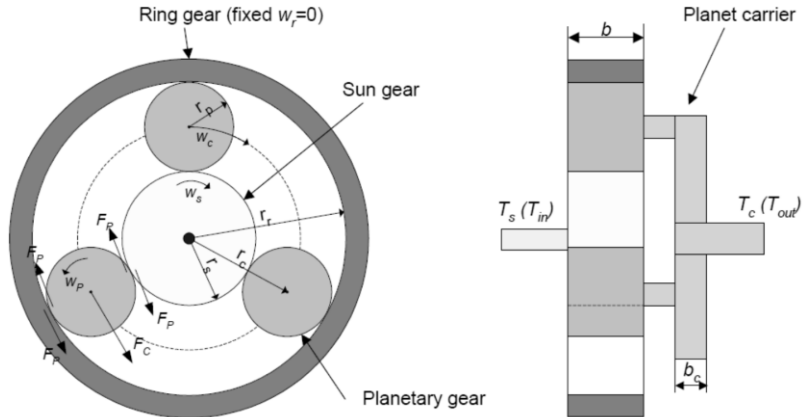
Gambar 2. 9. Mekanisme percepatan *panetary gear set* [8]

Dengan menahan *carrier*, putaran dari *input sun gear* ditransmisikan ke *panet gear* yang berputar hanya pada sumbu putar dan tanpa gerakan relatif terhadap *sun gear*, dengan demikian putaran *ring gear* akan sama dengan putaran *panet gear* yang berlawanan dengan putaran input *sun gear* yang diperlihatkan pada gambar 2.10.



Gambar 2. 10. Mekanisme Perubahan arah putaran *input-output planetary gear set* [8]

2.3.2 Rasio Transmisi Planetary Gear Set



Gambar 2. 11. Diagram kinematik *planetary gear set* [9]

Untuk menentukan rasio dari *planetary gear set*, persamaan (2.1) digunakan sebagai dasar perhitungan. Gambar 2.11 menunjukkan konfigurasi mekanisme reduksi (*ring gear stationary*) dengan demikian persamaan yang dapat dibentuk:

$$i_b = \frac{\omega_s - \omega_c}{\omega_r - \omega_c} = -\frac{z_r z_c}{z_c z_s} = -\frac{z_r}{z_s} = -\frac{r_r}{r_s} \quad (2.1)$$

Dengan *ring gear* pada posisi diam maka persamaan (2.1) menjadi:

$$i_b = \frac{\omega_s - \omega_c}{0 - \omega_c} = 1 - \frac{\omega_s}{\omega_c} \quad (2.2)$$

Buku karangan Damir.T.Jelaska, *Gears and Gear Drives* (2012), menjelaskan hubungan rasio (*i*) dengan *input-output* dari suatu transmisi roda gigi sebagai berikut:

$$i = \frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{z_{out}}{z_{in}} = \frac{r_{out}}{r_{in}} = -\frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (2.3)$$

Dari persamaan 2.3 untuk kondisi pada gambar 2.11 dimana *ring gear* pada posisi diam, *sun gear* sebagai *input* dan *planet-carrier* sebagai *output*, persamaan yang dapat dibentuk:

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{z_c}{z_s} = \frac{r_c}{r_s} = -\frac{T_c}{T_s} \quad (2.4)$$

Substitusi persamaan (2.2) dan (2.4) menghasilkan persamaan rasio (*i*) transmisi untuk konfigurasi pada gambar 2.11.

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_c} = 1 - i_b$$

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_c} = 1 + \frac{z_r}{z_s} = \frac{z_r + z_s}{z_s} = \frac{r_r + r_s}{r_s}$$

(2.5)

Persamaan (2.5) dapat ditulis ulang menjadi persamaan (2.6) untuk penggunaan yang melibatkan jumlah gigi (*z*), dan jari-jari roda gigi (*r*):

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_c} = \frac{R + S}{S} = -\frac{T_c}{T_s} \quad (2.6)$$

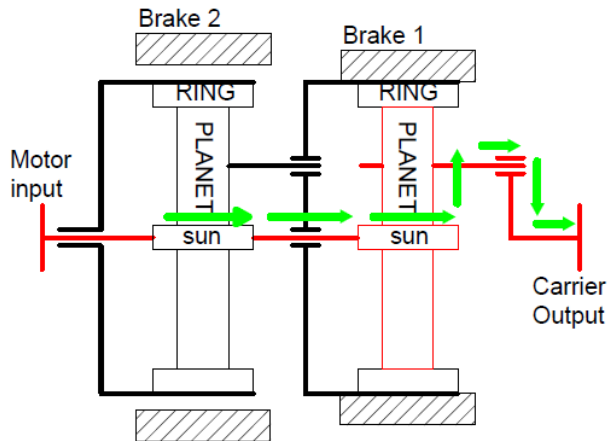
Menggunakan persamaan (2.6) dan (2.3) sebagai acuan dasar perhitungan, persamaan rasio *planetary gear* untuk setiap kondisi dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2. 4. Konfigurasi *rasio planetary gear set* dengan variasi *input-output* dan komponen yang ditahan (*stationary*).

Stationary	Persamaan Rasio (i)	Input	Output	Torsi (T)	Kecepatan Putar (ω)	Direction Output
Ring Gear	$i = \omega_s / \omega_c = R + S / S$	sun gear	carrier	Meningkat	Reduksi	Searah input
	$i = \omega_c / \omega_s = S / R + S$	carrier	sun gear	Reduksi	Meningkat	Searah input
Carrier	$i = \omega_s / \omega_r = R / S$	sun gear	ring gear	Meningkat	Reduksi	Kebalikan input
	$i = \omega_r / \omega_s = S / R$	ring gear	sun gear	Reduksi	Meningkat	Kebalikan input
sun gear	$i = \omega_r / \omega_c = R + S / R$	ring gear	carrier	Reduksi	Meningkat	Searah input
	$i = \omega_c / \omega_r = R / R + S$	carrier	Ring gear	Meningkat	Reduksi	Searah input

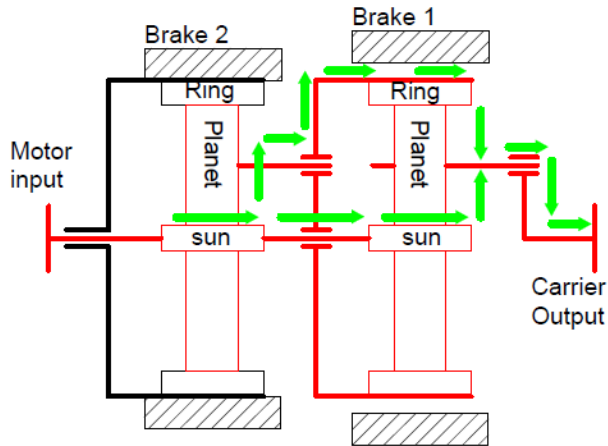
2.3.3 Rasio Epicyclic Gear Train

Untuk beberapa keperluan, transfer putaran dan torsi dari *panetary gear* membutuhkan tingkat rasio yang berbeda. Perubahan rasio tersebut dapat dilakukan dengan dua metode yang pertama adalah mengubah desain *planetary gear* dan yang kedua adalah dengan menambahkan *planetary gear* lain pada sistem. Gambar 2.12 menunjukkan sekema rangkaian sistem transmisi *planetary gear* (*Epicyclic Gear*) dengan 2 *stage planetary gear carrier-ring configuration* dengan asumsi bahwa jumlah gigi tiap *sage planetary gear* adalah sama. Dengan menyusun beberapa *planetary gear*, maka rasio dari transmisi akan berubah sesuai dengan jumlah set dari *planetary gear*.



Gambar 2. 12 Mekanisme 2 stage planetary gear, brake 1 aktif

Pada konfigurasi yang ditunjukkan pada gambar 2.12, sistem *input* terhubung dengan ketiga *sun gear* pada tiap *stage planetary gear* dan untuk tiap *stage output* dari *carrier* tergabung dengan *ring gear* pada *stage planetary gear* berikutnya. Konfigurasi diatas adalah ilustrasi untuk transmisi gigi 1 dengan menahan *ring gear* menggunakan *brake 1*, dengan demikian rasio dari sistem *epicyclic gear train* adalah sama dengan rasio yang dihasilkan oleh *single stage planetary gear* pada persamaan (2.6). Untuk mengubah rasio pada sistem *epicyclic gear train* dilakukan dengan memvariasikan penahanan *ring gear* tiap *stage planetary gear* untuk menambahkan input kedua pada *planetary gear final stage*. Dengan menambahkan input baru pada *planetary gear final stage* maka akan dihasilkan rasio yang berbeda dari sebelumnya.



Gambar 2. 13 Mekanisme 2 stage planetary gear, brake 2 aktif

Sekema pada gambar 2.13 menunjukkan sistem pada kondisi gigi 2, dimana pada pada sekema ini bagian yang ditahan adalah *ring gear planetary gear 2* melalui *brake 2*. Menggunakan analisa yang sama dengan *single stage planetary gear* persamaan yang dapat dibentuk untuk menentukan rasio adalah sebagai berikut, dengan menggunakan notasi 1 dan 2 untuk penamaan *planetary gear* pada tiap tingkatan.

$$i_2 = \frac{\omega_s}{\omega_{c2}} = \frac{R+S}{S} = -\frac{T_{c2}}{T_{c2}}$$

$$i_2 = \omega_{c2} = \frac{S}{R+S} \omega_s \quad (2.7)$$

Pada *stage 1 planetary gear* pada gambar 2.13 Menunjukkan bahwa terdapat 2 *input* yang memiliki kecepatan putar yang berbeda. Persamaan (2.8) [9] digunakan untuk menganalisis

stage 1 planetary gear yang merupakan *final stage* sistem transmisi dengan 2 *input* berbeda.

$$\omega_{c1} = \frac{\omega_s S + \omega_{r1} R}{S + R} \quad (2.8)$$

Rasio gigi 2 dari *epicyclic gear train* dapat dibentuk melalui substitusi persamaan (2.7) dan (2.8), dimana $\omega_{c2} = \omega_{r1}$

$$\begin{aligned} \omega_{c1} &= \frac{\omega_s S + \omega_{r1} R}{S + R} \\ \omega_{c1} &= \frac{\omega_s S + \frac{S}{R+S} \omega_s R}{S + R} \\ \omega_{c1} &= \left(\frac{S}{S + R} + \frac{SR}{(S + R)^2} \right) \omega_s \end{aligned} \quad (2.9)$$

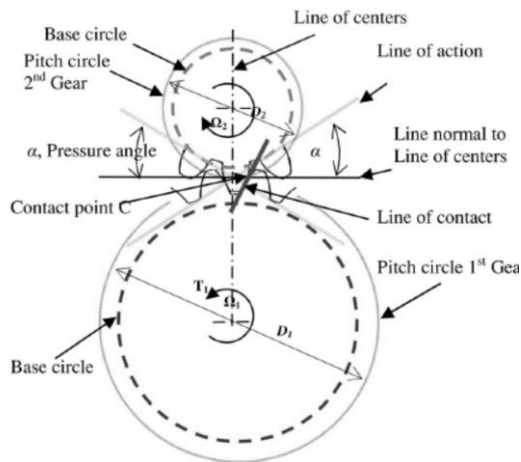
Berdasarkan pembahasan pada rasio transmisi *planetary gear set*, persamaan (2.9) dapat ditulis ulang menjadi rasio dari transmisi *epicyclic gear train* pada gigi 2 (percepatan 2) sebagai berikut.

$$\frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{\omega_s}{\omega_{c1}} = \left(\frac{S}{S + R} + \frac{SR}{(S + R)^2} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

Metode analisa yang sama dapat digunakan untuk menentukan rasio dengan beberapa jenis konfigurasi penahanan *ring gear* pada tiap *stage planetary gear*, dengan demikian sistem akan memiliki fleksibilitas dalam menghasilkan besar rasio yang diinginkan.

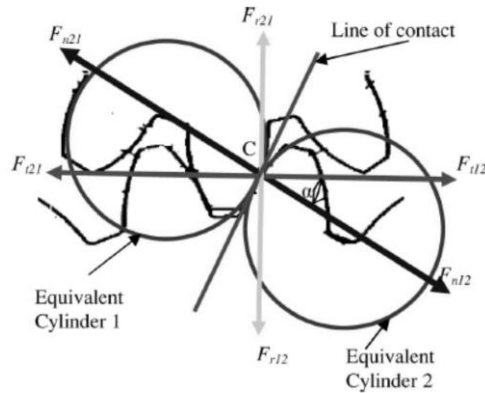
2.3.4 Komponen Gaya Planetary Gear

Gambar 2.14 memberikan beberapa definisi dasar dari geometri roda gigi saat saling berhubungan. Garis aksi (*line of action*) adalah garis singgung kedua lingkaran dasar, sudut tekan (α) adalah sudut diantara garis normal ke garis pusat (*line normal to line of centers*) dan garis aksi, titik temu antara garis garis center dengan garis aksi dinamakan *pitch poin*, *pitch poin* akan membentuk *pitch circle* jika dibuat lingkaran dengan jari-jari dari pusat lingkaran roda gigi ke *pitch poin*. Geometri ini digunakan lebih lanjut untuk perhitungan gaya dan torsi yang bekerja serta dasar dari proses manufacturing pembuatan roda gigi.



Gambar 2. 14. Geometri dasar roda gigi [10]

Jika input torsi (T_1) diaplikasikan pada roda gigi 1 pada gambar 2.14 komponen dari gaya yang berkerja pada rangkaian roda gigi tersebut dapat diuraikan seperti pada gamba 2.15 dengan prinsip hukum aksi-reaksi.



Gambar 2. 15. Komponen gaya pada roda gigi [10]

Pada gambar 2.15 menunjukan gaya-gaya yang bekerja pada suatu rangkaian roda gigi, gaya-gaya tersebut adalah gaya tangensial (F_t), gaya normal (F_n), dan gaya radial (F_r). Hubungan torsi (T) terhadap gaya-gaya tersebut dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$F_t = \frac{T}{0.5D} \quad (2.11)$$

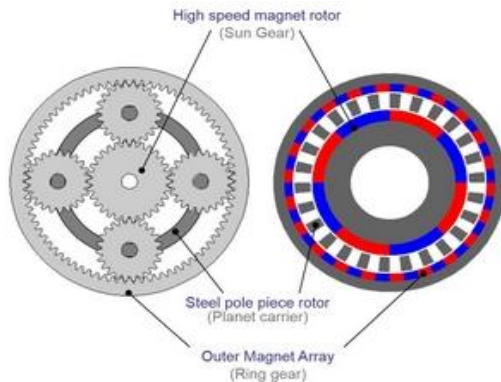
$$F_r = F_t \tan \alpha \quad (2.12)$$

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha} \quad (2.13)$$

2.3 Magnetic Planetary Gear (Coaxial Magnetic Gear)

Magnetic planetary gear memiliki dua derajat kebebasan (2-DOF), jika dua input digunakan untuk menghasilkan satu output. 2-DOF akan menjadi 1-DOF jika salah satu komponen ditahan (*stationary*). Melihat dari prinsip kerja yang digambarkan pada gambar 2.16 menunjukan

kesamaan antara *magnetic planetary gear* dengan *mecanical planetary gear*. Penggunaan roda gigi pada *sun gear* dan *ring gear* pada *mecanical planetary gear* digantikan oleh permanen magnet. Komponen *planet gear* pada *mecanical planetary gear* digantikan oleh komponen *steel segmen / steel pole piece*. *Steel segmen* adalah komponen yang terdiri dari bahan *ferromagnetic* yang mampu menghantarkan *flux* magnetik. *Steel segment* berfungsi layaknya *panet gear*. Ketika *steel segment* ditahan, maka komponen *outer rotor (ring gear)* dapat berputar akibat *flux* magnetik dari *high rotor (sun gear)* sebagai input putaran dan *outer rotor (ring gear)* sebagai output yang terhubung oleh *steel segment*.



Gambar 2. 16. Konfigurasi *magnetic planetary gear set* [11]

2.4.1 Torsi Magnetic Gear.

Perhitungan Torsi dan gaya menggunakan metode elemen hingga (FEM) merupakan salah satu bagian penting dari metode ini. Pada pemecahan masalah mesin elektrik / *electical machine* terdapat empat pendekatan untuk menghitung besar

torsi dan gaya : *Maxwell stress tensor*, *co-energy method*, *Lorentz force equation*, dan *rate of change of field energy method*. Metode yang paling sering digunakan untuk pendekatan perhitungan torsi dan gaya adalah metode *co-energy method*, dan *Maxwell stress tensor*.

a. Co-Energy method

Metode ini mendasarkan perhitungan dari *stored magnetic co-energy* (W) terhadap perubahan posisi. Perubahan *magnetik energi* pada rentan jarak tertentu (s) menghasilkan gaya (F_s) searah perpindahan (s).

$$F_s = \frac{dW}{ds} = \frac{\Delta W}{\Delta s} \quad (2.14)$$

Pendekatan terhadap torsi (T) dilakukan dengan mengamati energi magnet seketika saat berputar dengan sudut putar θ yang kecil.

$$T = \frac{dW}{d\theta} = \frac{\Delta W}{\Delta \theta} \quad (2.15)$$

Berdasarkan pada prinsip persamaan (2.15) transformasi energi magnet menjadi energi mekanik dapat dijelaskan melalui persamaan (2.16) [12]. Persamaan ini mengasumsikan energi magnet $W(\theta)$ tersimpan pada *air gap*.

$$W(\theta) = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (2.16)$$

Dimana,

μ_0 = konstanta relatif permeability udara (H/m atau N/A²).

V = volume *air gap* (m³).

B = magnetic flux density pada *air gap* (Wb / T).

Dengan mengasumsikan posisi awal *input rotor* pada posisi $\theta = 0^\circ$. Ketika *input rotor* bergerak sebesar δ persamaan (2.16) menjadi (2.18) dengan varisasi dari perubahan volume *air gap* pada persamaan (2.17).

$$\Delta v = L_s l_{g1} \left(r_{g1} 2\pi \frac{d\delta}{2\pi} \right) = L_s l_{g1} r_{g1} d\delta \quad (2.17)$$

$$W(\theta) = \frac{L_s l_{g1} r_{g1}}{2\mu_0} \oint_v B^2 d\delta \quad (2.18)$$

Dimana,

L_s = panjang *air gap* arah axial (m).

l_{g1} = *air gap* diantara dua *rotor* (m).

R_{g1} = radius rata-rata *air gap* (m).

Kombinasi dari persamaan (2.15) dan persamaan (2.18) digunakan untuk menghitung besar torsi pada *input rotor*,

$$T_1(\theta) = \frac{-\delta \left[\frac{L_s l_{g1} r_{g1}}{2\mu_0} \oint_v B^2 d\delta \right]}{\delta(\theta)} \quad (2.19)$$

Dimana

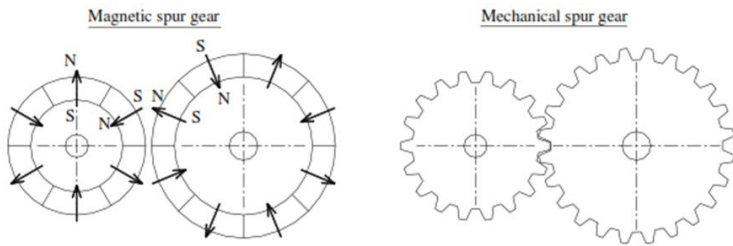
$T_1(\theta)$ = torsi *input rotor* fungsi perubahan sudut θ .

Metode yang sama dapat digunakan untuk menganalisa torsi (T_2) pada rotor output dengan menyesuaikan parameter menggunakan komponendari *outer rotor*,

$$T_2(\theta) = \frac{-\delta \left[\frac{L_s l_{g2} r_{g2}}{2\mu_0} \oint_v B^2 d\delta \right]}{\delta(\theta)} \quad (2.20)$$

2.4.2 Dasar Magnetic Gear

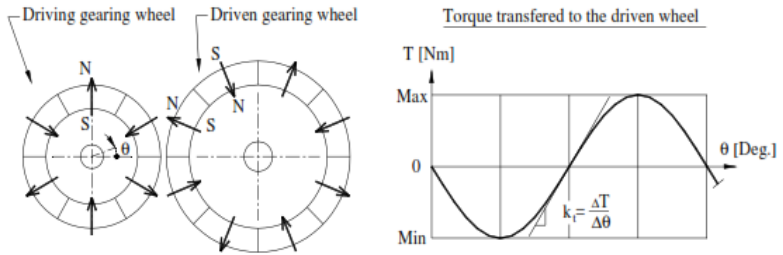
Gear dapat didefinisikan sebagai mekanisme transfer putaran dan torsi dari suatu poros ke poros yang lain. Dalam pembahasan ini transfer putaran dan torsi tersebut dapat melalui konfigurasi roda gigi maupun permanen magnet seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.17 berikut.



Gambar 2. 17. Perbandingan *magnetic planetary gear* dan *mecanical planetary gear* [13]

Sistem roda gigi mekanik / *mechanical gears* transfer putaran dan torsi terjadi melalui kontak fisik tiap gigi dari *mechanical gears*. Sedangkan pada *magnetic gear* kontak fisik tidak terjadi. Permanen magnet pada *magnetic gear* mentransmisikan putaran dan torsi melalui fenomena *fictive torsion spring effect*. *Fictive torsion spring effect* fenomena ini dapat digambarkan dengan menahan salah satu *magnetic gear* dan memutar *magnetic gear* lain dalam sudut putar yang kecil [14]. Gambar 2.18 menunjuka ilustrasi interaksi magnetik dengan mengasumsikan *driven wheel* pada posisi diam dan *driving gear* bergerak pada kecepatan putar tertentu, maka torsi

magnetik dengan pole berbeda (+) dan flux magnetik dengan pole yang sama (-) akan menghasilkan grafik torsi magnetik sinusoidal. Torsi maksimum akan terjadi pada kutub magnet yang saling bertemu pada titik dimana arah pole sejajar pada gambar 2.18. Pada sistem magnetic gear pertemuan flux magnetik pada saat pole magnet berbeda akan menghasilkan torsi maksimum pada arah positif dan flux magnetik pada arah yang sama akan menghasilkan torsi yang bernilai negatif. Karakteristik torsi *magnetic gear* memiliki kesamaan dengan fenomena karakteristik torsi pada *synchronous machines*.



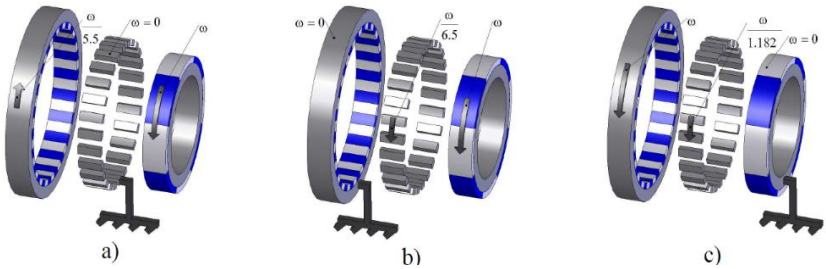
Gambar 2. 18 Karakteristik torsi pada *magnetic gear* [13]

2.4.3 Rasio Planetary Magnetic Gear

Atalla k., dkk pada *journal Design Analysis and Realization of a High-Performance Magnetic Gear* membahas hubungan jumlah komponen permanent magnet dan *steel pole* pada suatu susunan *magnetic gear*. Jumlah dari pasang kutub pada *rotor* harus sesuai dengan jumlah pasang magnet harmonik *rotor* lainnya, kondisi ini digambarkan dari hasil penurunan rumus dan menghasilkan rumus (2.21).

$$n_s = P_h + P_l \quad (2.21)$$

P_h , P_l , dan n_s masing-masing adalah permanen magnet pada *inner rotor (high rotor)* dan *outer rotor (low rotor)* dan *steel segmen*. Dari persamaan (2.21), rasio dari susunan *magnetic planetary gear* dapat mengikuti prinsip perhitungan *mechanical* dari persamaan (2.1). Pada gambar 2.19 menunjukkan sistem *magnetic gear* dengan jumlah *pole* masing-masing adalah *inner rotor (high rotor)* 4 pasang permanen magnet, *outer rotor (low rotor)* 22 pasang permanen magnet, dan 26 bahan feromagnetik pada *steel segment* [13].



Gambar 2. 19. *Magnetic planetary gear set* dengan variasi *input-output* dan komponen yang ditahan. [13]

2.4.3.1 Rasio Steel segmen Kondisi Diam

Gambar 2.19 (a) mengilustrasikan kondisi dimana *steel segmen* dalam kondisi diam, *high rotor* sebagai *output* dan *low rotor* sebagai *input*. Menggunakan persamaan (2.3) dan (2.21) persamaan rasio (i) untuk kondisi ini adalah.

$$i = \frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{\omega_l}{\omega_h} = \frac{p_h}{p_l} = \frac{(n_s - p_l)}{(n_s - p_h)} \quad (2.22)$$

Pada kondisi ini arah dari kecepatan putar *output* adalah kebalikan dari arah kecepatan putar *input*. Persaman (2.22) dan

(2.3) dapat digunakan untuk mengestimasi besar dari torsi (T) yang ditransmisikan *input-output* melalui persamaan.

$$-\frac{T_{output}}{T_{input}} = -\frac{T_l}{T_h} = \frac{p_l}{p_h} = \frac{(n_s - p_l)}{(n_s - p_h)}$$

$$T_l = \frac{(n_s - p_l)}{(n_s - p_h)} \cdot (-T_h) \quad (2.23)$$

2.4.3.2 Rasio Outer Rotor Kondisi Diam

Gambar 2.19 (b) mengilustrasikan kondisi dimana *outer rotor (low rotor)* dalam kondisi diam, *inner rotor (high rotor)* sebagai input dan *steel segmen (steel pole)* sebagai output. Persamaan rasio (i) untuk kondisi ini adalah sebagai berikut.

$$i = \frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{\omega_h}{\omega_s} = \frac{n_s}{P_h} = \frac{n_s}{(n_s - p_l)} \quad (2.24)$$

Persamaan torsi (T) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.3) dan (2.24) menjadi persamaan berikut.

$$-\frac{T_{output}}{T_{input}} = -\frac{T_s}{T_h} = \frac{n_s}{p_h} = \frac{n_s}{(n_s - p_l)}$$

$$T_s = \frac{n_s}{(n_s - p_l)} \cdot (-T_h) \quad (2.25)$$

2.4.3.3 Rasio Inner Rotor Kondisi Diam

Gambar 2.19 (c) mengilustrasikan kondisi dimana *inner rotor (high rotor)* dalam kondisi diam, *outer rotor (low rotor)* sebagai input dan *steel segment (steel pole)* sebagai output. Persamaan rasio (i) untuk kondisi ini adalah sebagai berikut.

$$i = \frac{\omega_{input}}{\omega_{output}} = \frac{\omega_l}{\omega_s} = \frac{n_s}{p_l} \quad (2.26)$$

Persamaan torsi (T) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.3) dan (2.26) menjadi persamaan berikut.

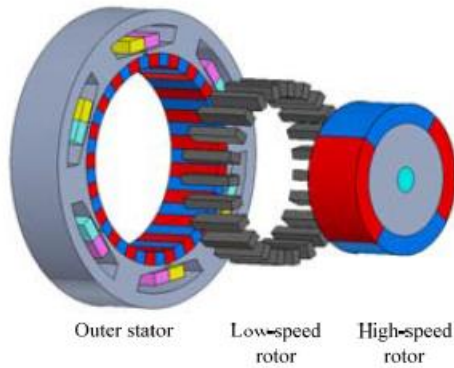
$$-\frac{T_{output}}{T_{input}} = -\frac{T_s}{T_l} = \frac{n_s}{p_l} = \frac{n_s}{(n_s - p_h)}$$

$$T_s = \frac{n_s}{(n_s - p_h)} \cdot (-T_l) \quad (2.27)$$

2.4 Pseudo Direct-Drive Technology (MAG SPLIT)

Magnomatics® telah lebih lanjut mengembangkan teknologi *magnetic gear* [15], dalam hal integrasi dari desain *magnetic planetary gear (coaxial magnetic gear)* dengan generator permanen magnet *brushless* yang dinamakan *Pseudo Direct-Drive (PDD) / MAGSPLIT®*. Desain dari teknologi ini ditunjukkan pada gambar 2.20. komponen utama dari *Pseudo Direct-Drive (PDD)* adalah sebagai berikut:

- a) *Output rotor / high-speed rotor*, komponen array permanen magnet dengan jumlah pole tertentu yang terhubung langsung dengan poros keluaran.
- b) *Input Rotor / low-speed rotor*, komponen yang terdiri dari *pole-pairs* bahan ferro-magnetik yang terhubung dengan *input* putaran.
- c) *Outer Stator*, komponen *stator* yang terhubung dengan *copper windings* yang digunakan untuk meggerakan permanen magnet *ring outer rotor* pada kontrol magnet (*control of the powersplit*) sebagai variabel pengubah rasio *input-output*.



Gambar 2. 20. Komponen *Pseudo Direct-Drive* (PDD) / MAGSPLIT®

Magnomatics® menghubungkan *control of the powersplit* dan mekanisme *magnetic planetary gear* dengan konfigurasi *outer rotor / low rotor* (P_l) sebagai bagian *stationary* yang dijelaskan pada sub-bab 2.4.3.2, namun pada gambar 2.20 menjelaskan bahwa *input* putaran terhubung dengan *low-speed rotor / steel segmen* (n_s) dan *output* putaran pada bagian *inner rotor / high-speed rotor* (P_h) sehingga terdapat penyesuaian rasio. Melalui pendekatan pada torsi keluaran seperti persamaan (2.3), dan dikombinasikan dengan torsi yang dihasilkan dari *control of the powersplit* (T_f) menghasilkan persamaan persamaan (2.28). berikut,

$$T_h = \frac{(n_s - p_l)}{n_s} \cdot (T_s) \pm T_f \quad (2.28)$$

Dimana T_s adalah torsi *input steel segmen* dari *engine*, T_h torsi *output* pada *inner rotor (high rotor)* yang terhubung dengan poros keluaran, dan T_f adalah torsi dari *synchronous machines*

pada bagian control unit (*control of the powersplit*). Hirata Laboratory, *Departement of Adaptive Machine System*, Osaka University [16], menjelaskan hubungan *magnetic gear* dan permanen magnet generator (motor listrik tiga fasa) melalui pendekatan kecepatan putar *input-output* dan kecepatan putar yang dihasilkan dari motor listrik tiga fasa melalui persamaan 2.31 berikut.

$$\omega_h = \frac{n_s}{(n_s - p_l)} \cdot \omega_s \pm \frac{120}{p_l} f \quad (2.29)$$

Dengan memvariasikan frekuensi (f) dari persamaan (2.29) akan menghasilkan kecepatan putar *output* yang bervariasi tanpa harus mengubah putaran dari *input*. Notasi \pm menunjukkan putaran dari *synchronous machines* searah *input* (+) atau berlawanan putaran *input* (-) dan notasi sebaliknya terjadi jika analisis digunakan pada tinjauan torsi yang dihasilkan. Torsi dari *output* PDD (T_h) dapat dihitung dengan keterkaitan torsi dan rasio pada persamaan 2.25 yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.4.3 dengan sebelumnya melakukan perhitungan besar torsi *synchronous machines* (T_f).

2.5 Finite Element Metode

Metode elemen hingga (FEM) adalah teknik numerik untuk memecahkan masalah yang dijelaskan oleh persamaan diferensial parsial atau dapat diformulasikan sebagai minimalisasi fungsional. Sebuah permasalahan disederhanakan menjadi kumpulan elemen hingga. Pendekatan fungsi dalam elemen hingga ditentukan dalam nilai-nilai nodal dari bidang fisik yang dicari. Proses *mesh* atau proses penyederhanaan suatu permasalahan dari objek hingga membentuk nodel untuk

dianalisa lebih lanjut secara sederhana ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2. 21. Proses *meshing*

Bagaimana metode ini bekerja dapat dijelaskan melalui serangkaian langkah analisis berikut [17],

- a. *Discretize the continuum*, langkah pertama adalah membagi wilayah solusi menjadi elemen hingga. *Finite element mesh* biasanya dihasilkan oleh program preprocessor. *Mesh* terdiri dari beberapa array utama dengan koordinat nodal dan konektivitas elemen.
- b. *Select interpolation functions*, melakukan interpolasi pada fungsi yang digunakan untuk tiap elemen. Fungsi polinomial lebih sering digunakan untuk interpolasi. Tingkat dari polinomial tergantung pada jumlah node digunakan pada elemen.
- c. *Find the element properties*, menetapkan persamaan matrik dari elemen hingga untuk menghubungkan nilai-nilai nodal dari fungsi yang tidak diketahui ke parameter lain. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan *variational* dan metode *garlerkin*.
- d. *Assemble the element equations*, untuk menemukan sistem persamaan global dari seluruh pemecahan region setiap elemen harus disatukan. Dalam hal ini koneksi antar elemen digunakan.

- e. *Solve the global equation system*, sistem persamaan global dari elemen hingga biasanya adalah simetris dan positif. Nilai dari nodal digunakan sebagai fungsi hasil pemecahan masalah.
- f. *Compute additional results*, dalam beberapa kasus kita perlu menghitung parameter tambahan. Misalnya dalam masalah mekanik yang berhubungan dengan tegangan dan renggangan terdapat pertambahan panjang, yang mana ini terjadi setelah hasil dari persamaan global terpecahkan.

2.6.1 Software Analisis

Analisis dengan *software* menggunakan *Maxwell* dari *Ansoft* atau *software finite element* lain yang mampu menganalisis permasalahan pada penelitian ini. *Software Maxwell* menggunakan metode kerja virtual untuk menghitung torsi untuk benda bergerak dalam simulasi *transien*. *Ansoft maxwell*, adalah salah satu program untuk analisis elektromagnetik 2D dan 3D. *Software maxwell* dapat menghitung medan listrik statis, gaya, torsi, dan medan magnet statis, serta induktansi yang disebabkan oleh arus DC. Kemampuan lain *Software maxwell* mampu menganalisis medan magnet eksternal statis, variasi waktu medan magnet, gaya, dan torsi, disebabkan oleh arus AC serta medan magnet eksternal yang berosilasi, maupun medan magnet *transien* yang disebabkan oleh sumber listrik dan permanen magnet.

2.6.2 Formulasi Finite Element Maxwell

Software maxwell memecahkan masalah elektromagnetik dengan menggunakan pendekatan dari persamaan *maxwell* dalam ruang terbatas dengan kondisi batas yang tepat dan kondisi awal yang ditentukan pengguna untuk

mendapatkan solusi pemecahan. Dalam kasus ini, intensitas medan magnet (H) dan *fluks density* (B) perlu diperhatikan :

$$\nabla \times H = J \quad (2.30)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.31)$$

Hubungan konstitutif antara H dan B untuk setiap material ditunjukkan sebagai berikut:

$$B = \mu H \quad (2.32)$$

Jika material yang digunakan merupakan jenis nonlinear (besi jenuh atau alnico magnet), permeabilitas, μ merupakan fungsi dari B :

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (2.33)$$

FEMM (Finite Elemen Method Magnetic) membahas tentang mencari besar suatu medan yang memenuhi persamaan (2.30) - (2.32) melalui pendekatan potential vektor magnetik. Kerapatan fluks ditulis dalam bentuk potensial vektor A , ditunjukkan pada persamaan berikut:

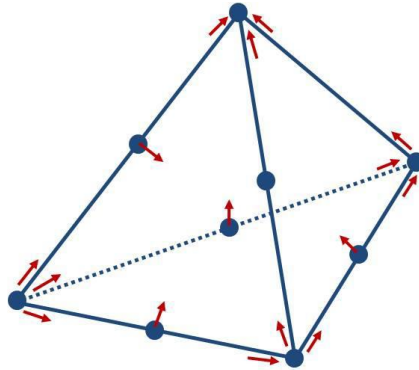
$$B = \nabla \times A \quad (2.34)$$

Sekarang, definisi B ini selalu memenuhi persamaan (2.31). Sehingga persamaan (2.30) dapat ditulis ulang sebagai:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (2.35)$$

FEMM mengkaji persamaan (2.35) sehingga masalah magnetostatik dengan hubungan B - H nonlinear melalui elemen-elemen hingga dapat dipecahkan. Pada *maxwell* 3D,

unit dasar elemen hingga / *finite element* yang digunakan adalah *tetrahedron*.



Gambar 2. 22 Ilustrasi model mesh 3D

Berdasarkan persamaan (2.35) Pemecahan dari *finite element tetrahedron* menggunakan persamaan matrik (2.36) dengan S sebagai koefisien global matrik.

$$[S][H] = [J] \quad (2.36)$$

Untuk evaluasi kesalahan pada bidang yang diselesaikan, energi yang dihasilkan pada seluruh volume dibandingkan dengan total energi yang dapat menghasilkan kesalahan. Nilai *percent error energy* digunakan untuk mengukur tingkat konvergensi solusi terhadap *mesh* yang disesuaikan secara adaptif.

$$\text{Percent error energy} = \frac{\text{error energy}}{\text{total energy}} \times 100\% \quad (2.37)$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1 Prosedur Penelitian

Pembahasan menitik beratkan penelitian pada analisa *finite element* menggunakan *software finite element maxwell electromagnetic / software finite element* lainnya. Fokus analisa pada hasil torsi dari *Pseudo Direct-Drive* menggunakan piranti lunak dan selanjutnya akan dibandingkan dengan tinjauan pustaka. Analisa menggunakan metode ini dilakukan dengan beberapa asumsi dan variasi yang akan dijelaskan pada sub bab 3.2.

Secara umum prosedur keseluruhan penelitian dikategorikan dalam beberapa tahapan sebagai berikut:

a. Study literature

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari artikel ilmiah, *journal*, *text book*, serta hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Diharapkan pada tahap ini terbentuk landasan kuat beraitan dengan dasar teori dan tahapan-tahapan penelitian berikutnya.

b. Desain dan simulasi

Pada tahap ini pemilihan desain dari *Pseudo Direct-Drive*, dengan sebelumnya memastikan piranti lunak yang digunakan *convergen* dan mendekati hasil dari penelitian terdahulu. Tahapan simulasi dikelompokan pada dua proses, *pre-processing*, dan *processing*.

c. Penyusunan Laporan

Hasil proses penelitian dan analisa selanjutnya akan disusun pada laporan. Laporan menggunakan format pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, pembahasan, dan kesimpulan.

3.2 Variabel Penelitian

Penelitian dilakukan dengan memvariasikan variable *air gap* (celah udara) pada desain *Pseudo Direct-Drive* dan menentukan seberapa besar *air gap* yang ideal untuk diaplikasikan pada desain. Variabel yang lain dari desain dijaga pada kondisi teteap.

3.2.1 Variabel Bebas

a. Air gap (celah udara)

Celah udara pada desain *Pseudo Direct-Drive* akan divariasikan mulai dari 0.5 mm hingga 1.5 mm dengan kelipatan 0.18 mm tiap variasi. Perubahan tersebut dilakukan dengan melakukan modifikasi desain dari *Pseudo Direct-Drive* awal pada *software* inventor dan disimulasi ulang pada *Maxwell / finite element software*.

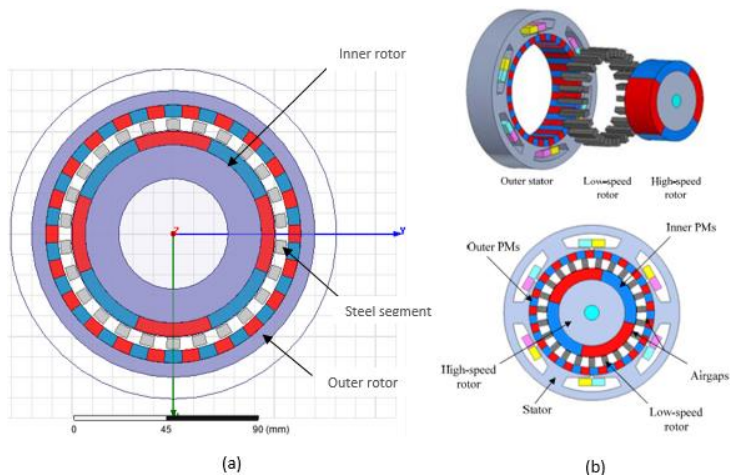
3.2.2 Variabel Tetap

- a. Permanen magnet yang digunakan pada penelitian adalah NdFeB 30.
- b. Putaran input untuk penelitian pengaruh *air gap* pada sistem *Pseudo Direct-Drive* pada putaran 1000 rpm pada inner rotor.
- c. *Steel segment* menggunakan bahan *feromagnetic steel* AISI 1010.

- d. *Ring inner* dan *outer rotor* menggunakan bahan *pure iron*.
- e. *synchronous machines* / *brushless permanent magnet motor* adalah motor 3 fasa tipe Y3 dengan jumlah *copper windings* sebanyak 42 *slot* atau kelipatan.
- f. Kecepatan putar dijaga tetap pada 500 rpm dengan daya *output* sebesar 1 kW.

3.3 Desain Penelitian

Desain penelitian akan mengacu pada persamaan rasio *input-output* yang akan berkaitan dengan penentuan jumlah permanen magnet dan *steel segment magnetic planetary gear* yang telah dijelaskan pada bab 2.4.3. Selanjutnya desain *magnetic planetary gear* gambar 3.1 (a) akan dimodifikasi dengan menambahkan *synchronous machines* menggantikan *stator rotor* (*outer rotor* pada sistem *magnetic planetary gear*) seperti pada gambar 3.1 (b) [18].

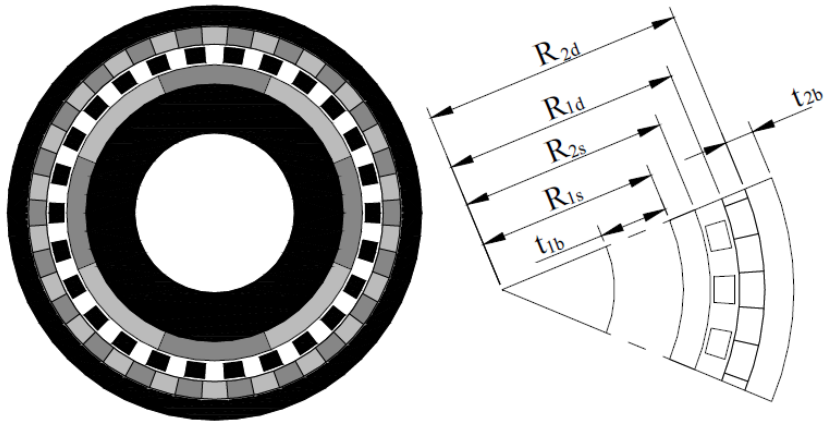


Gambar 3. 1. Desain *Pseudo Direct-Drive*

Tabel dan gambar berikut menunjukkan data dan dimensi dari desain *magnetic planetary gear* dari penelitian yang dilakukan oleh Jorgensen, Frank Thorleif, pada tahun 2010. Penelitian akan menggunakan magnetic planetary gear tersebut sebagai dasar pengembangan penelitian untuk selanjutnya diubah menjadi *Pseudo Direct-Drive*.

Tabel 3. 1. Data desain magnetic planetary gear

Parameter	Value
Jumlah steel segment (n_s)	26
Jumlah permanen magnet/PM inner rotor (P_h)	8 (4 pasang)
Jumlah permanen magnet/PM outer rotor (P_l)	44 (22 pasang)
Tebal ring inner rotor (t_{1b})	16.5 mm
Tebal ring outer rotor (t_{2b})	7 mm
Radius inner rotor tanpa PM (R_{1s})	43.5 mm
Radius <i>inner rotor</i> dengan PM (R_{2s})	50.5 mm
Radius outer rotor dengan PM (R_{1d})	57 mm
Radius outer rotor tanpa PM (R_{2d})	63 mm
Tebal <i>steel segment</i>	5 mm
Tebal permanen magnet / PM	6 mm
Panjang arah axial <i>magnetic planetary gear</i> (L)	50 mm
Lebar <i>air gap</i>	1 mm
<i>Relative permability</i> magnet (μ_r)	1.05 Tm/A
<i>Relative permability</i> air region	$4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A
<i>Coercivity</i>	947350 A/m
Material permanen magnet	NdFeB 30
Material <i>steel segment</i>	Steel AISI 1010
Material inner-outer rotor	Pure Iron



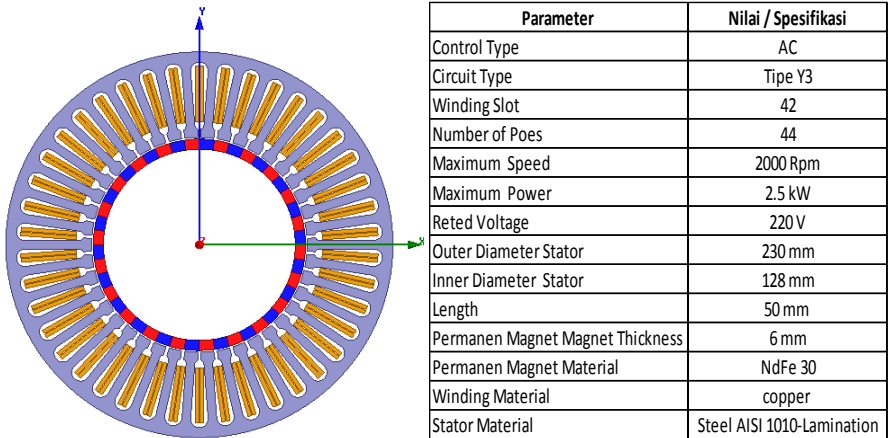
Gambar 3. 2. Desain *magnetic planetary gear* [14]

3.3.1 Desain Adjust-Speed Synchronous Machine

Desain *adjust-speed synchronous machine* mengacu parameter pada batasan-batasan masalah, dan beberapa parameter dibuat *default setting* sehingga *software* akan secara otomatis mengkalkulasi kebutuhan parameter lainnya. Gambar 3.3 berikut adalah spesifikasi utama dari desain *Adjust-Speed Synchronous Machine* untuk digunakan sebagai pengganti *outer rotor* pada *magnetic planetary gear*.

Pembuatan desain *adjust-speed synchronous machine* menggunakan RMxprt pada *Ansoft maxwell*. *Software* tersebut akan mengkalkulasi performa mesin dari *input* parameter desain. Desain dari RMxprt selanjutnya diubah keformat 2D *transient* untuk menggantikan *outer rotor* pada *magnetic planetary gear*. Beberapa parameter dari RMxprt yang dipindahkan ke 2D

transient akan menjadi *default setting* berdasar data spesifikasi utama dan batasan-batasan masalah



Gambar 3. 3 Desain dan spesifikasi *adjust-speed synchronous machine*

3.4 Metode Analisa Software Finite Element Pada Magnetic Planetary Gear

Analisa menggunakan *software maxwell Electromagnetic* terbagi dalam dua tahapan, pertama *Pre-Processing* membuat desain dari penelitian dan memastikan simulasi *software* memiliki keakuratan yang telah ditentukan, kedua adalah tahapan *Processing* pada tahapan ini model akan disimulasi dan hasil dari simulasi akan dianalisa lebih lanjut. Langkah – langkah tiap tahapan analisa *software* dijelaskan pada sub-bab berikut.

3.4.1 Pre-Processing

a. Pembuatan Model

Pembuatan model *Pseudo Direct-Drive* dilakukan di Inventor yang kemudian dipindahkan ke *Ansys Maxwell*.

b. *Solution Type*

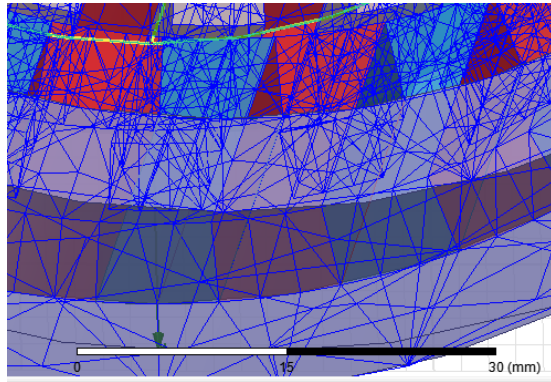
Pada langkah ini analisa awal pada *Ansoft maxwell* menggunakan *Magnetostatic analysis* untuk mengatur keakurasian hasil analisa *software*.

c. *Material Input*

Menentukan jenis material yang digunakan pada desain, pemilihan material disesuaikan dengan data tabel. 3.1.

d. *Mesh*

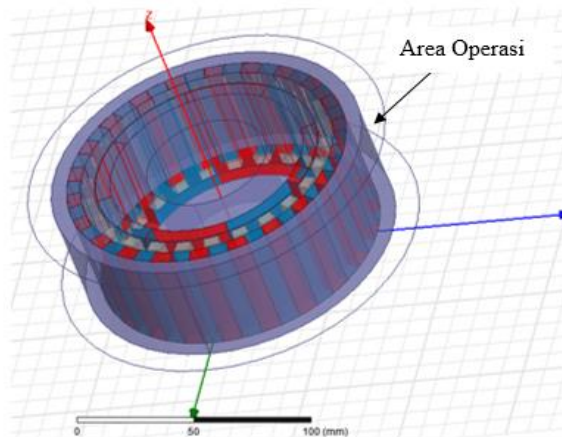
Pembuatan mesh dilakukan pada model yang telah dibuat. *Meshing volume* yang digunakan adalah tipe *tetrahedra*. Metode *meshing* yang digunakan adalah *length-Based mesh* (mesh berbasis panjang). Contoh hasil mesh dapat dilihat pada gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3. 4 *Mesh* 3D tetrahedra

e. Area Operasi

Menentukan daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. Dalam penelitian ini *region* yang digunakan yaitu udara.



Gambar 3. 5 Area Operasi

f. *Boundary Conditions dan Excitations*

Set *Eddy Current Boundaries dan Excitations* ke mode *default*, maka boundary akan otomatis tersetting ke *natural boundaries* untuk analisa *magnetic planetary gear*.

g. *Parameter output*

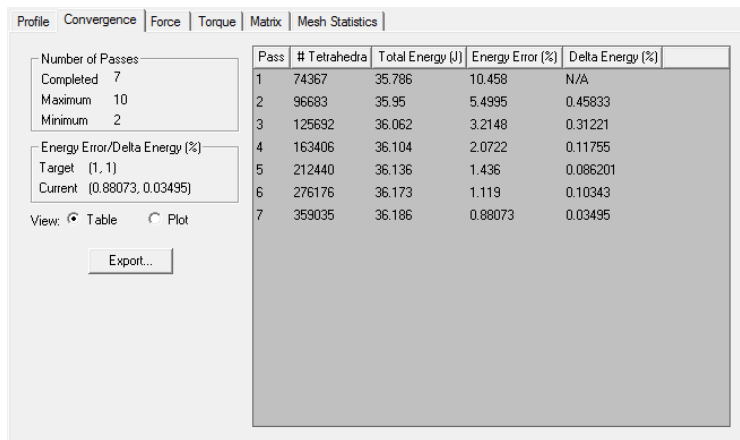
Menentukan parameter output hasil analisa *software*, dalam hal ini adalah torsi dari *input rotor* dan *output rotor*.

h. *Tahap convergence test pada Magnetostatic analysis*

Pada tahap ini memastikan *error* pada nilai yang telah ditentukan, dengan melakukan pengaturan pada *menu analysis*. Pada bagian *adaptive setup* di *menu analysis* pilih jumlah *maximum passes* dan *percent error* yang dikehendaki. Menu yang sama pada bagian *convergence* tentukan *minimum passes* dan *minimum convergence passes*, analisa akan berhenti secara otomatis jika nilai *minimum convergence passes* telah tercapai tanpa literasi hingga *maximum passes*. Proses analisa *software* dinyatakan *convergen*, jika *delta energy* dan *energy error* hasil analisa menunjukan *pass* dengan nilai sama atau lebih kecil dari *percent error* yang ditentukan. Pada pengujian *convergence* ini menggunakan *percent error* 1%, *maximum passes* 10, *minimum passes* 2, dan *minimum convergence passes* 1.

i. *Result Magnetostatic analysis*

Hasil analisa secara otomatis akan menunjukkan jumlah *passes*, *delta energy* dan *energy error*. Hasil dari analisa dapat diakses melalui menu *result* pada *solution data*. Gambar 3.6 Menunjukkan hasil analisa *convergence* penelitian ini.



Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	74367	35.786	10.458	N/A
2	96683	35.95	5.4995	0.45833
3	125692	36.062	3.2148	0.31221
4	163406	36.104	2.0722	0.11755
5	212440	36.136	1.436	0.086201
6	276176	36.173	1.119	0.10343
7	359035	36.186	0.88073	0.03495

Gambar 3. 6. Hasil Pengujian *convergence*

3.4.2 Processing

a. *Solution Type*

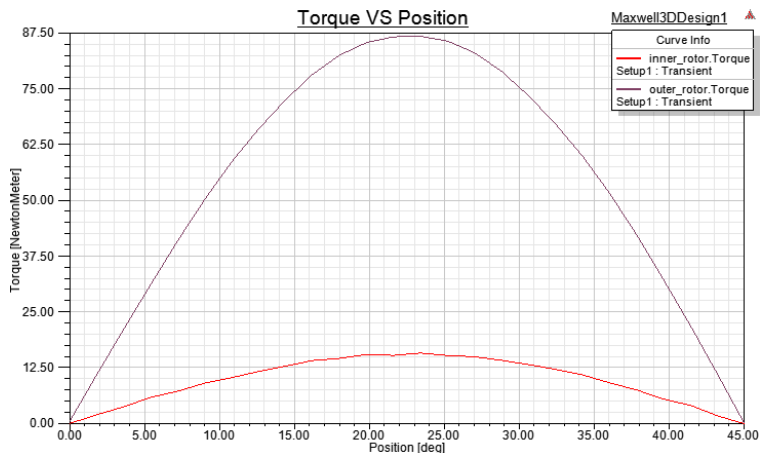
Pada tahap *processing*, *solution type* yang digunakan adalah *Transient analysis* dengan mengganti pada menu maxwell 3D dan *Tool*.

b. *Motion setup*

Penentuan parameter objek yang bergerak, dan kecepatan putar yang diinginkan melalui pengaturan pada bagian *model setup* di menu *maxwell 3D*.

c. Tahap analisa *Transient analysis*

Pada tahap ini *Processing* akan dimulai setelah memilih menu *analyze all* pada *toolbar*. Hasil dari analisa dapat diakses melalui menu *result* untuk dianalisis lebih lanjut.

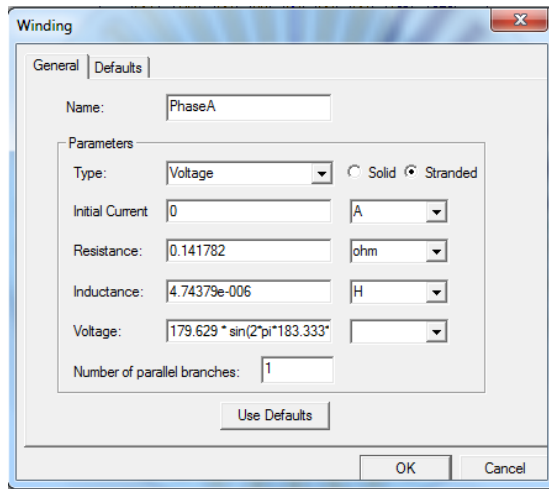


Gambar 3. 7. Hasil Pengujian *magnetic planetary gear*

3.5 Metode Analisis Software Finite Element Pada Pseudo Direct-Drive / PDD

Simulasi desain *Pseudo Direct-Drive* PDD menggunakan simulasi 2D *transient* software *maxwell*, simulasi 3D *transinet* tidak dimungkinkan karena keterbatasan pada analisis harus menggunakan *2 motion setup*. Langkah simulasi desain *Pseudo Direct-Drive* (PDD) adalah dengan

menggabungkan simulasi 2D *transinet* analisis *magnetic planetary gear* dan simulasi *adjust-speed synchronous machine* pada satu simulasi 2D *transient* analisis. Gambar 3.8 berikut adalah contoh *setting windding phase A adjust-speed synchronous machine* yang menjadi *default setting* pada simulasi 2D *transient* analisis.

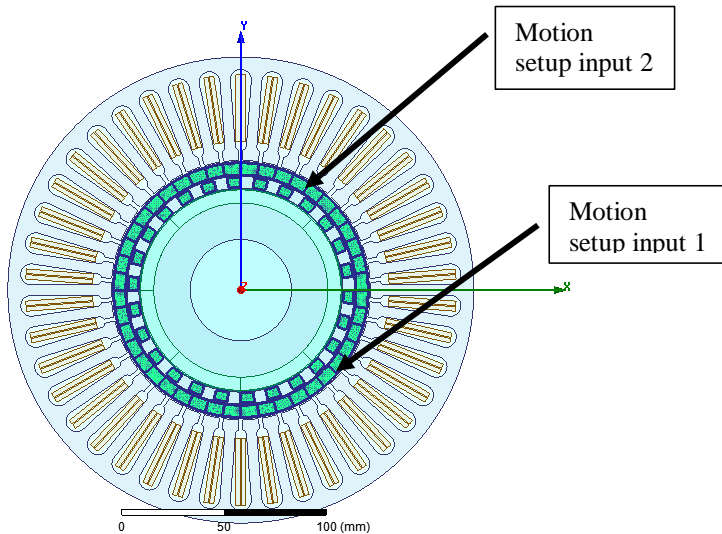


Gambar 3. 8. *Default setting winding phase A*

3.5.2 Proses Simulasi Pseudo Direct-Drive (PDD) Pada 2D Transient

Seperti pada simulasi 3D *transient magnetic planetary gear* prosedur yang sama dilakukan pada simulasi 2D *transient*. Perbedaan terjadi hanya pada peletakan *band / motion setup*, pada simhulasi 2D *transient motion setup* pertama diletakan pada *outer rotor* dan *motion setup* kedua diletakan pada sisi *input* di *inner magnet* atau pada *steel segment*, gambar 3.9 berikut adalah contoh peletakan *motion setup* pada sisi *steel*

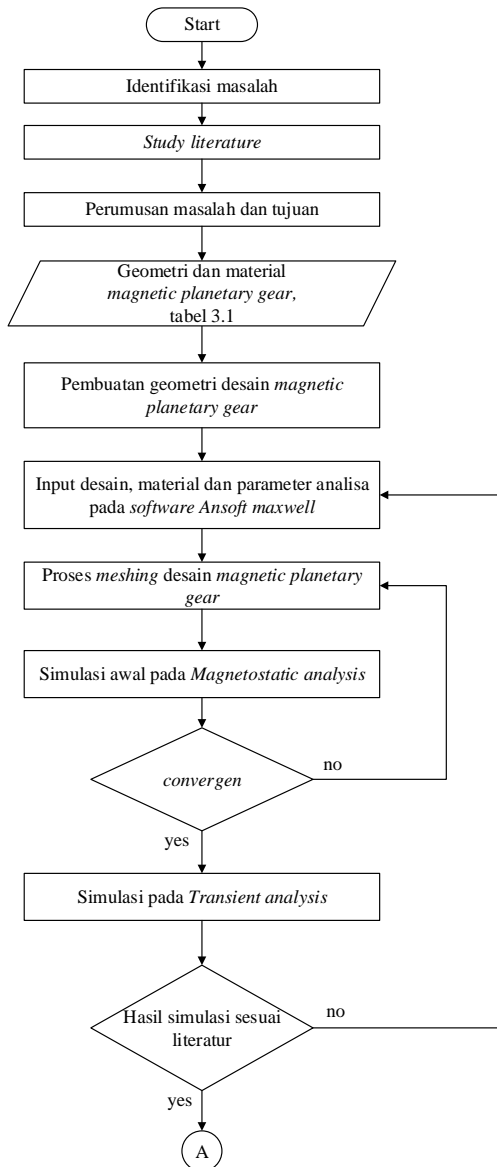
segment sebagai *input* dan *outer rotor* sebagai *control unit* PDD.

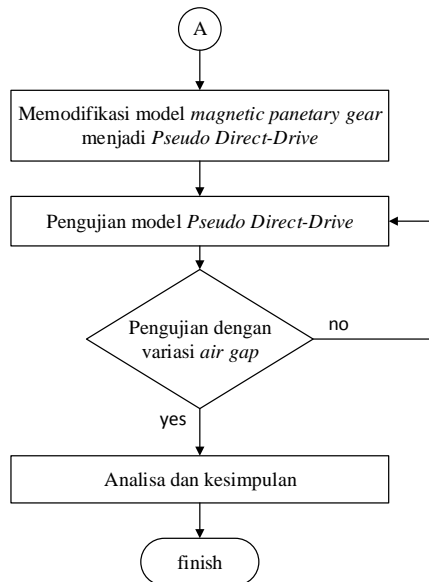


Gambar 3. 9. Konfigurasi dua *motion setup* pada simulasi 2D *transient*

3.5 Detail Langkah Penelitian

Penelitian *Pseudo-Direct Drive* dengan metode *finite elemen* mengikuti langkah – langkah yang dijelaskan pada diagram alir (*flow chart*) berikut.





Gambar 3. 10. *Flowchart* Penelitian

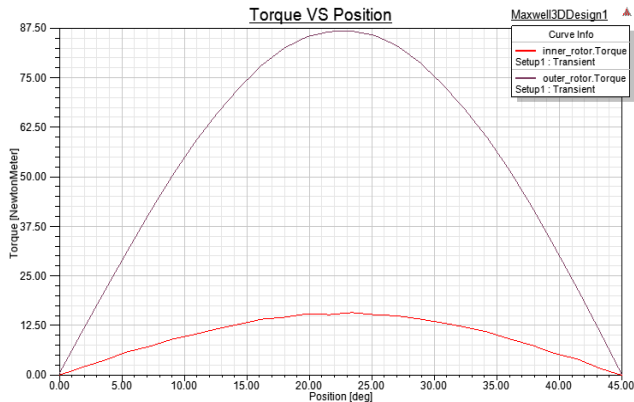
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Magnetic Planetary Gear

Pada tahapan ini simulasi dilakukan untuk melihat besar torsi yang dapat dihasilkan *magnetic planetary gear* yang merupakan komponen utama sistem. Torsi yang dihasilkan akan menjadi bahan perbandingan dengan hasil penelitian terdahulu dimana desain dan parameter simulasi mengikuti penelitian sebelumnya. Desain *magnetic planetary gear* penelitian terdahulu pada data tabel 3.1 menghasilkan torsi *outer rotor* sebesar 90.2 Nm dengan *air gap* 1 mm dan *input* putaran 100 rpm pada sisi *inner rotor*. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software ANSYS Maxwell 16.0.*, hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.1, dimana torsi maksimum *outer rotor* berada pada 87 Nm dan torsi *inner rotor* pada 15.5 Nm, dengan asumsi *steel segmen* sebagai komponen yang ditahan.



Gambar 4. 1. Grafik torsi maksimum simulasi 3D *transient magnetic planetary gear*, *air gap* 1 mm

Perbandingan hasil penelitian terdahulu dan hasil simulasi menggunakan *software ANSYS Maxwell* dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1. Perbandingan hasil simulasi *software Maxwell* dengan penelitian terdahulu

Torsi Magnetic Planetary Gear	Simulasi Maxwell	Penelitian Terdahulu
	87 Nm	90.2 Nm

Berdasarkan persamaan (2.20), hasil simulasi pada gambar 4.1 menunjukkan kesesuaian dengan persamaan tersebut melalui model matematik berikut, dengan konfigurasi *input* pada *inner rotor*, *output* pada *outer rotor*, dan *steel segmen* sebagai komponen yang ditahan.

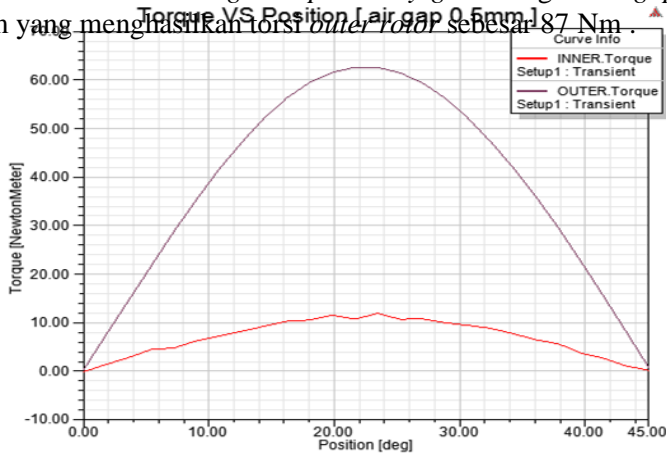
$$\frac{T_{output}}{T_{input}} = \frac{T_l}{T_h} = \frac{p_l}{p_h} = \frac{(n_s - p_l)}{(n_s - p_h)}$$

$$\frac{T_{output}}{T_{input}} = \frac{87Nm}{15.5Nm} = 5.61$$

Dengan jumlah *pole* dari *inner rotor* adalah 4 pasang megnet (P_l) dan jumlah *pole* dari *outer rotor* adalah 22 pasang magnet (P_h), maka rasio berdasarkan jumlah *pole* adalah.

$$\frac{p_l}{p_h} = \frac{22}{4} = 5.5$$

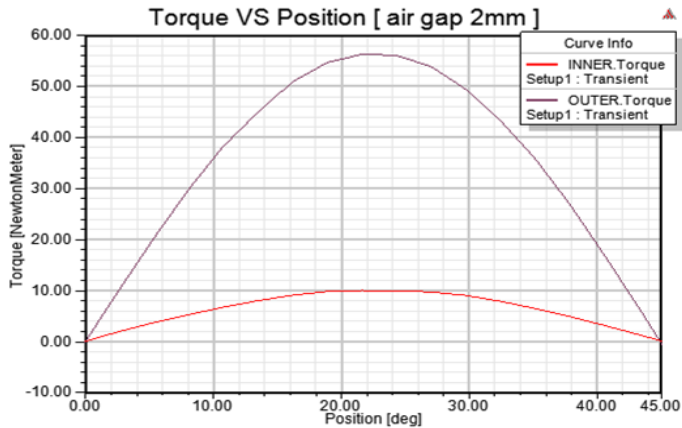
Pengujian *magnetic planetary gear* berikutnya mengacu pada perubahan *air gap* untuk melihat pengaruh perubahan tersebut terhadap torsi. Perubahan *air gap* menjadi 0.5 mm menghasilkan torsi sebesar 62 Nm pada *outer rotor* yang diperlihatkan oleh gambar 4.2, dimana hasil tersebut lebih kecil dari hasil simulasi *magnetic planetary gear* dengan *air gap* 1 mm yang menghasilkan torsi *outer rotor* sebesar 87 Nm.



Gambar 4. 2. Grafik torsi maksimum simulasi 3D *transient magnetic planetary gear*, *air gap* 0.5 mm

Pengujian yang sama menggunakan *air gap* 2 mm menunjukkan penurunan torsi *outer rotor* dari 87 Nm pada *air gap* 1 mm menjadi 56 Nm pada *air gap* 2 mm, hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 4.3. Konfigurasi dari *magnetic planetary gear* masih menggunakan *outer rotor* sebagai *output*, *inner rotor* sebagai *input* dan *steel segmen* sebagai komponen yang ditahan. Hasil tersebut telah sesuai dengan hasil yang diperoleh pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Jorgensen, Frank Thorleif pada tahun 2010, yang menyatakan bahwa peningkatan

air gap pada *magnetic gear* akan menurunkan torsi dari *magnetic gear* tersebut.



Gambar 4. 3. Grafik torsi maksimum simulasi 3D *transient magnetic planetary gear*, *air gap* 2 mm

Berdasarkan prinsip *co-energy* pada persamaan (2.16), dimana persamaan tersebut mengasumsikan energi magnet $W(\theta)$ yang tersimpan pada *air gap*, maka hipotesis awal yang dapat dibentuk adalah energi yang tersimpan pada *air gap* akan lebih tinggi jika *air gap* diperkecil dan hal sebaliknya akan terjadi jika *air gap* diperbesar. Meningkatnya *energi magnet* diakibatkan oleh *magnetic flux density* yang tinggi pada volume *air gap* yang lebih kecil antar *pole*, dengan demikian torsi yang merupakan turunan ke-3 dari *magnetic flux density* dan *magnetic energy* akan mengalami peningkatan. Untuk membuktikan hipotesis ini maka diperlukan verifikasi, untuk itu pada analisis *magnetic planetary gear* penulis menambahkan dua simulasi verifikasi pada *software ANSYS Maxwell 16.0*. Simulasi pertama adalah mengubah simulasi pada masing-masing *air gap* dari 3D *transient* ke 3D *magnetostatic* untuk

melihat total *magnetic energy* yang terbentuk dengan tidak merubah parameter apapun, dan yang kedua adalah melakukan simulasi pada *2D transient*.

4.1.1 Hasil Verifikasi Simulasi 3D Magnetostatic Magnetic Planetary Gear

Gambar 4.4 menunjukkan hasil data *convergence* untuk simulasi *magnetic planetary gear* pada 0.5 mm, dengan tingkat *error* 1.5%. Data tersebut menunjukkan total *magnetic energy* pada konfigurasi *air gap* 0.5 mm sebesar 39.8 J, meningkatnya total energi akan berdampak pada peningkatan torsi dari *magnetic planetary gear*. Hasil data simulasi 3D *magnetostatic* dan 3D *transient* untuk *magnetic planetary gear* dengan konfigurasi *air gap* 0.5 mm menunjukkan hasil yang saling bertentangan.

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)	
1	34696	37.38	21.75	N/A	
2	45110	37.6	15.504	0.58963	
3	58652	38.232	11.112	1.6799	
4	76251	38.795	8.1535	1.4726	
5	99133	39.038	6.2169	0.62799	
6	128880	39.205	4.7347	0.42781	
7	167552	39.333	3.5083	0.32665	
8	217826	39.487	2.5098	0.39027	
9	283182	39.68	1.931	0.48921	
10	368146	39.844	1.5124	0.41436	

Gambar 4. 4. Hasil simulasi 3D *magnetostatic magnetic planetary gear*, *air gap* 0.5 mm

Simulasi berikutnya menggunakan *air gap* 1 mm yang merupakan *baseline* perbandingan, dengan tingkat error 1.5%. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.5 dimana total *magnetic energy* pada error 1.5% berada pada nilai 37.1 J. *Magnetic energy* pada *air gap* 1 mm mengalami penurunan dari 39.8 J pada *air gap* 0.5 mm menjadi 37.1 J.

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)	
1	33716	36.345	12.061	N/A	
2	43841	36.608	8.0513	0.72371	
3	57001	36.776	5.3374	0.45845	
4	74107	36.897	3.797	0.3297	
5	96344	37.02	3.0032	0.33335	
6	125251	37.097	2.2349	0.20817	
7	162834	37.141	1.6592	0.11731	
8	211688	37.174	1.2805	0.08908	
9	275204	37.199	1.03	0.069363	
10	357768	37.212	0.82271	0.033437	

Gambar 4. 5. Hasil simulasi 3D *magnetostatic magnetic planetary gear, air gap* 1 mm

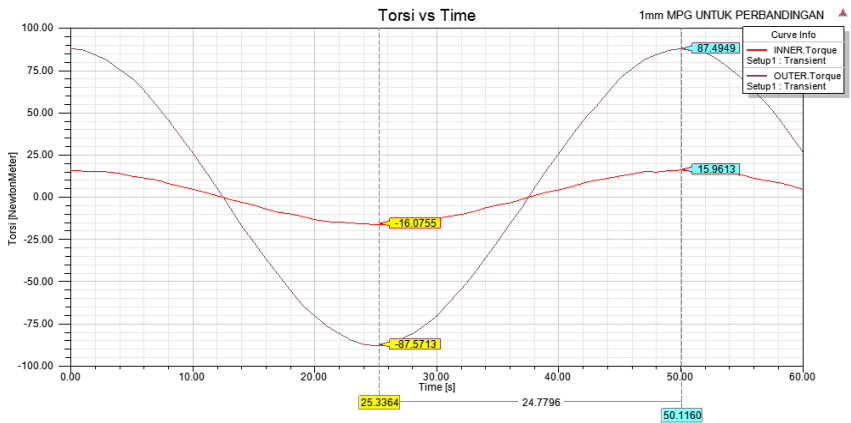
Hasil simulasi *magnetic planetary gear* dengan *air gap* 2 mm ditunjukkan pada gambar 4.6. Gambar tersebut memberikan informasi total *magnetic energy* pada tingkat error 1.5% sebesar 33.5 J. Hasil tersebut menunjukkan bahwa total *magnetic energy* menurun jika *air gap* di perbesar, hal ini dikarenakan ruang / volume yang besar menurunkan kerapatan *flux magnetic*, berdasarkan konsep dari persamaan *co-energy* maka hasil tersebut telah sesuai.

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)	
1	27126	32.732	18.284	N/A	
2	35270	32.536	11.798	0.59967	
3	45859	32.821	7.7262	0.87807	
4	59625	33.017	5.4245	0.59488	
5	77519	33.26	4.0392	0.73631	
6	100782	33.365	3.0857	0.31695	
7	131022	33.422	2.4114	0.17117	
8	170338	33.438	1.8736	0.047982	
9	221450	33.505	1.488	0.20088	
10	287893	33.589	1.2041	0.25085	

Gambar 4. 6. Hasil simulasi 3D *magnetostatic magnetic planetary gear*, *air gap* 2 mm

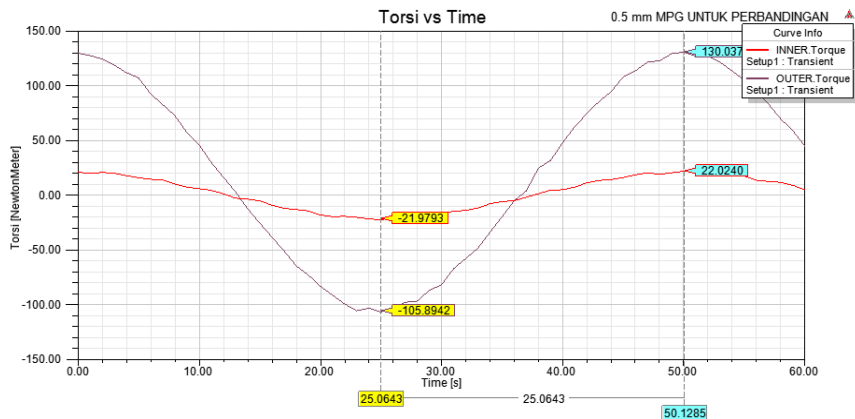
4.1.2 Hasil Verifikasi Simulasi 2D Transient Magnetic Panetary Gear

Verifikasi menggunakan simulasi 2D *transient* bertujuan untuk menyederhanakan proses perhitungan elemen hingga dan mengurangi tingkat *error mesh* akibat bentuk geometri 3D yang lebih rumit. Simulasi 2D *transient* menggunakan desain, material, dan pengaturan *mesh* yang sama dengan simulasi 3D *transient*. Gambar 4.7 menunjukkan hasil simulasi untuk *air gap* 1 mm, hasil tersebut menunjukkan torsi maksimum *outer rotor* pada 87.5 Nm dimana hasil tersebut mendekati hasil yang diperoleh pada simulasi *magnetic planetary gear* 3D *transient*.



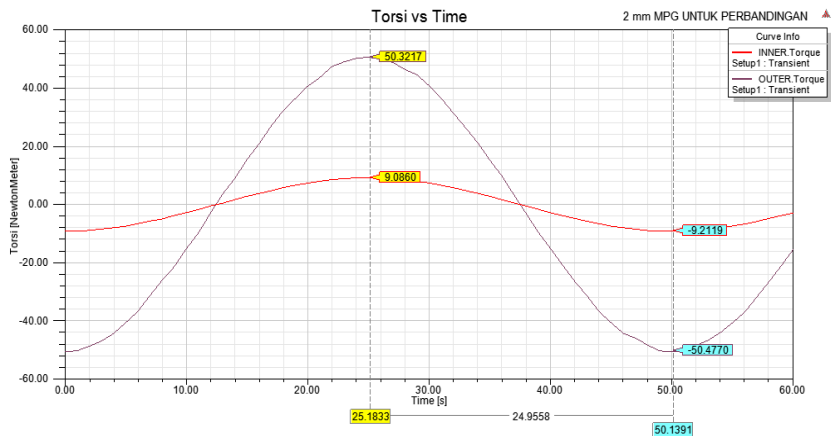
Gambar 4. 7. Grafik torsi maksimum simulasi 2D *transient magnetic planetary gear, air gap 1 mm*

Simulasi berikutnya menggunakan *air gap* 0.5 mm. Hasil simulasi ditunjukkan gambar 4.8 dimana torsi pada sisi *outer rotor* berkisar pada 105.89 Nm hingga 130 Nm. Hasil torsi pada simulasi 0.5 mm menunjukkan nilai torsi yang lebih besar dari simulasi menggunakan *air gap* 1 mm.



Gambar 4. 8. Grafik torsi maksimum simulasi 2D *transient magnetic planetary gear*, *air gap* 0.5 mm

Hasil simulasi untuk *air gap* 2 mm yang ditunjukkan oleh gambar 4.9, gambar tersebut memperlihatkan hasil torsi *maksimal magnetic planetary gear* pada 50.32 Nm hingga 50.47 Nm. Hasil tersebut menunjukkan kesesuaian dengan persamaan torsi melalui pendekatan metode *co-energy*. Berdasarkan prinsip tersebut maka *magnetic energy* yang tersimpan pada *air gap* akan menurun akibat kerapatan *flux magnetic* yang kecil dengan demikian maka torsi yang dihasilkan akan menurun seiring penambahan *air gap*.



Gambar 4. 9. Grafik torsi maksimum simulasi 2D *transient magnetic planetary gear*, *air gap* 2 mm

4.1.3 Analisis Hasil Simulasi Magnetic Planetary Gear

Tabel 4.2 berikut menunjukkan keseluruhan data hasil simulasi dari *magnetic planetary gear* menggunakan beberapa metode simulasi.

Tabel 4. 2. Perbandingan hasil simulasi magnetic planetary gear dengan beberapa metode simulasi.

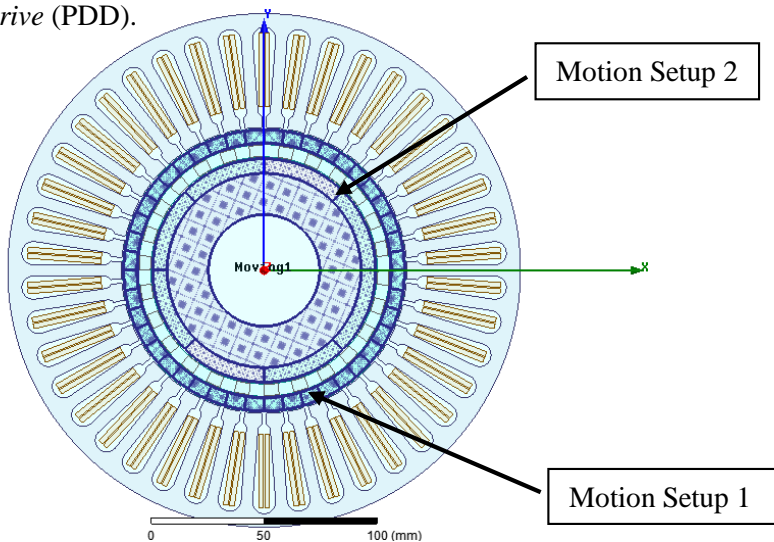
Simulasi Magnetic Planetary Gear	Air Gap 0.5 mm	Air Gap 1 mm	Air Gap 2 mm
Penelitian terdahulu (torsi maksimum)	-	90.2 Nm	-
3D transinet Maxwell (torsi maksimum)	62 Nm	87 Nm	56 Nm
2D transient Maxwell (torsi maksimum)	117.94 Nm	87.5 Nm	50.4 Nm
3D magnetostatic Maxwell (total energi)	39. 8 J	37.1 J	33.5 J

Berdasarkan prinsip metode *co-energy* dalam mengkalkulasi besar torsi, dengan memperkecil jarak *air gap* maka torsi akan meningkat dan hal sebaliknya akan terjadi jika jarak *air gap* diperbesar. Berdasarkan pada hasil verifikasi melalui 3D *magnetostatic* dan 2D *transient*, hasil pada simulasi *air gap* 0.5 mm 3D *transient* mengalami kontradiksi dengan dua hasil verifikasi. Ketidak sesuaian hasil pada simulasi 3D *transient* untuk 0.5 mm *air gap* diakibatkan oleh tranfer data desain dari model *inventor* ke model analisis *maxwell* membuat beberapa geometri mengalami *error*. Geometri *error* tersebut tidak menggagalkan simulasi, sehingga proses perhitunag element hingga pada simulasi 3D *transient* terus berjalan dan menghasilkan kalkulasi yang kurang tepat.

4.2 Hasil Simulasi Pseudo Direct-Drive / PDD

Simulasi *magnetic planetary gear* yang diintegrasikan dengan *brushless permanent magnet machine / Pseudo Direct-Drive* membutuhkan minimal dua konfigurasi *motion setup*

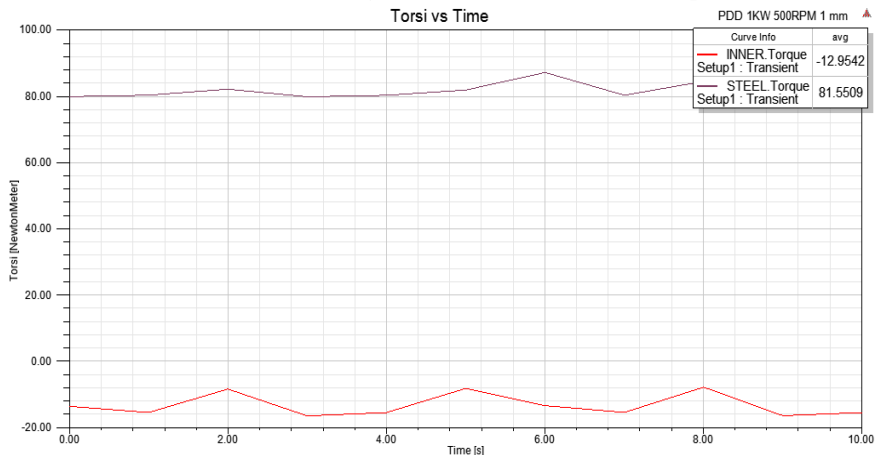
[19]. *Motion setup* atau dalam bahasa program *finite element maxwell* dikenal sebagai “*band*” digunakan untuk mengkalkulasi besar torsi dinamis melalui perhitungan *transient* terhadap *energy magnetic* yang berada pada *air gap*. Penggunaan lebih dari satu *setup motion / band* pada *software finite element maxwell* hanya bisa dilakukan pada simulasi menggunakan *2D transient*. Gambar 4.10 menunjukkan konfigurasi *setup motion/band* pada simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD).



Gambar 4. 10. *Motion setup* 2D transient *Pseudo Direct-Drive*

Simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) menggunakan konfigurasi *motion setup* pada gambar 4.10 dengan *input* 1000 rpm pada *motion setup* 1 (*inner rotor*) dan 500 rpm pada *motion setup* 2 (*outer rotor*). Hasil simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) ditunjukkan oleh gambar 4.11 dengan penggunaan *air*

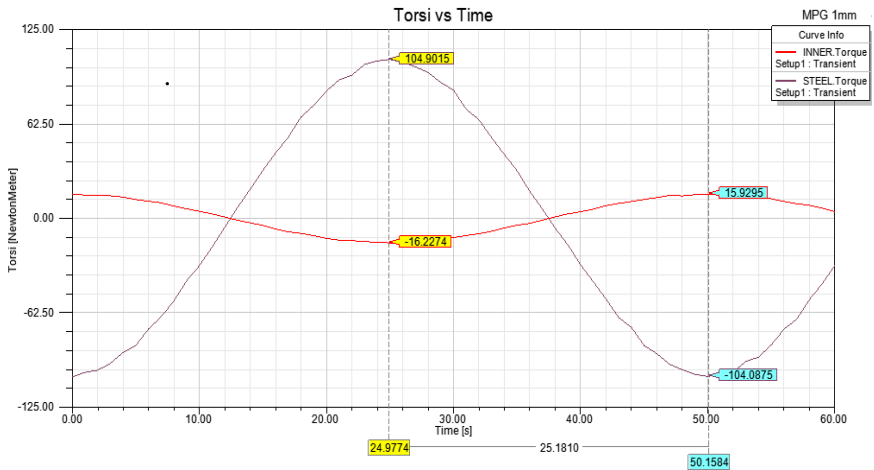
gap 1 mm. Torsi rata-rata dari *inner rotor (input)* adalah 12.95 Nm dan torsi dari *steel segmen* adalah 81.55 Nm (*output*).



Gambar 4. 11. Grafik torsi simulasi 2D *transient Pseudo Direct-Drive*, air gap 1 mm

4.2.1 Verifikasi Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive*, Air Gap 1 mm

Proses verifikasi hasil simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) yang diperlihatkan pada gambar 4.11 dilakukan dengan sebelumnya melakukan simulasi awal pada *magnetic planetary gear* pada mode 2D *transient* dengan memberikan *input* putaran sebesar 1000 rpm pada sisi *inner rotor*. Hal tersebut dilakukan untuk melihat torsi maksimum *magnetic planetary gear* sebelum diubah ke *Pseudo Direct-Drive* dengan memberi *input* kecepatan putar yang sama. Hasil dari simulasi 2D *transient magnetic planetary gear* dapat dilihat pada gambar 4.12, dimana torsi maksimum pada sisi *steel segmen (output)* adalah 104.9 Nm dan torsi rata-rata pada sisi *inner rotor (input)* adalah 16.02 Nm



Gambar 4. 12. Grafik torsi maksimum *magnetic pametary gear*, air gap 1 mm, *steel segmen* sebagai output

Dari data hasil simulasi 2D *transient Pseudo Direct-Drive* (PDD) gambar 4.11 dan data hasil simulasi 2D *transient magnetic pametary gear* (MPG) pada gambar 4.12, hubungan kedua data tersebut dapat dijelaskan pada model matematik berikut, dengan kondisi dimana *control rotor* dan *input* berputar pada arah kecepatan putar yang sama. Kecepatan putar *outer rotor* (*control rotor*) dan *inner rotor* (*input* putaran) yang sama berdampak pada meningkatnya kecepatan putar pada sisi *steel segmen*, dengan demikian torsi *output* pada sisi *steel segmen magnetic panetary gear* (T_s) akan mengalami penurunan dari torsi maksimumnya pada hasil simulasi 4.12 akibat pengaruh torsi yang dihasilkan *outer rotor / control rotor* (T_f).

$$T_s = \frac{n_s}{(n_s - p_l)} \cdot (T_h) - T_f$$

Torsi yang dihasilkan oleh *outer rotor / control rotor* (T_f) dengan putaran motor 500 rpm dan daya *output* 1 kW adalah sebesar 19.09 Nm, dan torsi *input* (T_h) berdasarkan hasil simulasi pada gambar 4.12 sebesar 16.02 Nm. Jumlah *pole* magnet *outer rotor* (P_i) dan jumlah *steel segmen* (n_s) menggunakan data pada tabel 3.1.

$$T_s = \frac{26}{(26 - 22)} \cdot (16.02) - 19.09$$

$$T_s = 84.23 \text{ Nm}$$

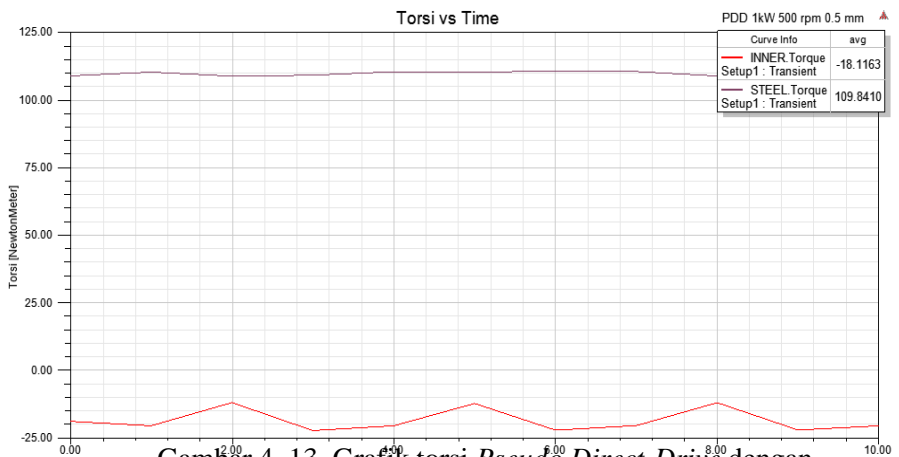
Hasil perhitungan torsi *output Pseudo Direct-Drive* (T_s) menggunakan konsep persamaan (2.28) menunjukkan kesesuaian hasil dengan data simulasi pada gambar 4.11.

4.3 Hasil Simulasi Pseudo Direct-Drive / PDD Dengan Variasi Air Gap

Pada tahapan ini simulasi dilakukan dengan mengubah *air gap* pada desain *Pseudo Direct-Drive* (PDD) untuk melihat pengaruh perubahan tersebut terhadap torsi yang dapat ditransmisikan. Pembahasan utama pada sub-bab 4.3 ini akan mengambil tiga hasil utama dari simulasi pengaruh *air gap*, konfigurasi *air gap* tersebut adalah pada 0.5 mm, 1 mm dan 1.5 mm, dimana hasil untuk *air gap* 1 mm telah disajikan pada sub-bab 4.2 sebagai materi verifikasi dan *baseline* pengujian.

4.3.1 Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* / PDD Dengan Air Gap 0.5 mm, dan 1.5 mm

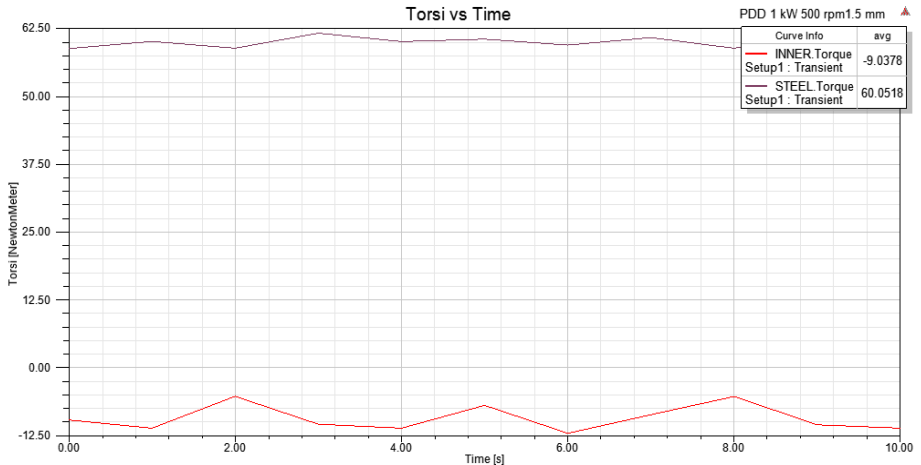
Hasil untuk simulasi menggunakan *air gap* 0.5 mm ditunjukkan oleh gambar 4.13, dimana torsi yang dihasilkan mengikuti fenomena yang terjadi pada *magnetic planetary gear*. Simulasi PDD dengan *air gap* 0.5 mm menghasilkan torsi sebesar 109.84 Nm pada sisi *steel segmen*, torsi tersebut lebih besar 28.29 Nm dari torsi yang dihasilkan simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) dengan konfigurasi *air gap* 1 mm.



Gambar 4. 13. Grafik torsi *Pseudo Direct-Drive* dengan *air gap* 0.5 mm

Hasil dari simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) dengan *air gap* sebesar 1.5 mm ditunjukkan pada gambar 4.14. Torsi yang dihasilkan dari *air gap* 1.5 mengalami penurunan dari torsi pada *air gap* 1 mm. Penurunan Torsi tersebut mengikuti

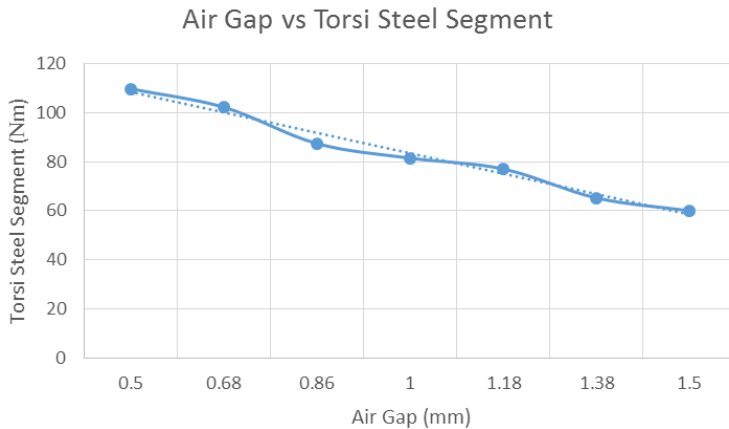
fenomena yang sama dengan *magnetic planetary gear* dimana *magnetic energy* akan menurun pada *air gap* yang yang besar.



Gambar 4. 14. Grafik torsi *Pseudo Direct-Drive* dengan *air gap* 1.5 mm

4.4 Analisis Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* / PDD

Gambar 4.15 menunjukkan grafik pengaruh *air gap* terhadap torsi dari *Pseudo Direct-Drive* (PDD). Grafik tersebut memperlihatkan hubungan yang relatif linier dari *air gap* dan torsi, mengikuti fenomena yang seperti pengaruh *air gap* pada *magnetic planetary gear* bahwa *air gap* yang kecil akan membuat kerapatan dari *magnetic flux* menjadi besar yang berdampak pada peningkatan *magnetic energy* dan torsi dari *magnetic gear*.



Gambar 4. 15. Grafik pengaruh *air gap* terhadap torsi *output*

Air gap yang kecil memiliki dampak lain selain meningkatkan *energy magnetic* dan torsi dari *magnetic gear*, dalam kasus *Pseudo Direct-Drive* (PDD), memperkecil *air gap* akan membuat efisiensi motor menurun. Efisiensi ini berdampak pada kebutuhan daya *input* motor yang besar dibandingkan *output* daya yang dikeluarkan, hal tersebut terjadi karena *winding* harus mendapatkan suplay daya yang cukup untuk memutar *pole* magnet pada sisi *outer rotor* dengan torsi yang besar akibat dari memperkecil *air gap*. Gambar 4.16 menunjukkan spesifikasi kebutuhan daya dan efisiensi dari *adjust-speed synchronous machine* dengan *air gap* 0.5 mm, 1 mm dimana setting output berdasarkan batasan masalah adalah 500 rpm dengan daya output 1 kW.

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2033750	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	98.8744	W	
9	Armature Copper Loss	38.6548	W	
10	Total Loss	138.779	W	
11	Output Power	1000.24	W	
12	Input Power	1139.02	W	
13	Efficiency	87.8159	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1031	NewtonMeter	
16	Torque Angle	17.3331	deg	
17	Maximum Output Power	3231.13	W	

a

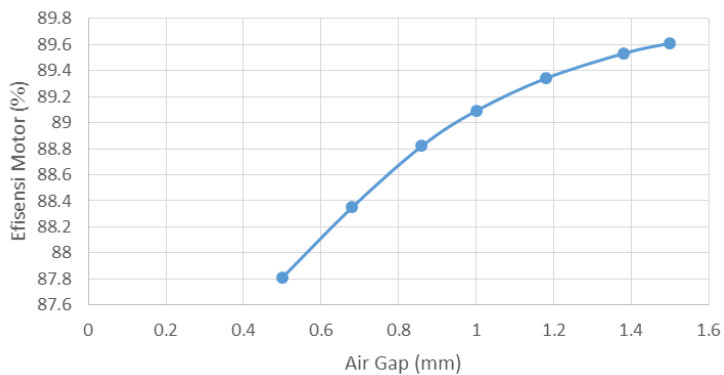
	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2309970	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	71.3687	W	
9	Armature Copper Loss	49.8678	W	
10	Total Loss	122.486	W	
11	Output Power	1000.22	W	
12	Input Power	1122.71	W	
13	Efficiency	89.0901	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1029	NewtonMeter	
16	Torque Angle	20.3772	deg	
17	Maximum Output Power	2771.56	W	

b

Gambar 4. 16. Data performa *adjust-speed synchronous machine* dengan *air gap* 0.5 mm (a) dan 1 mm (b)

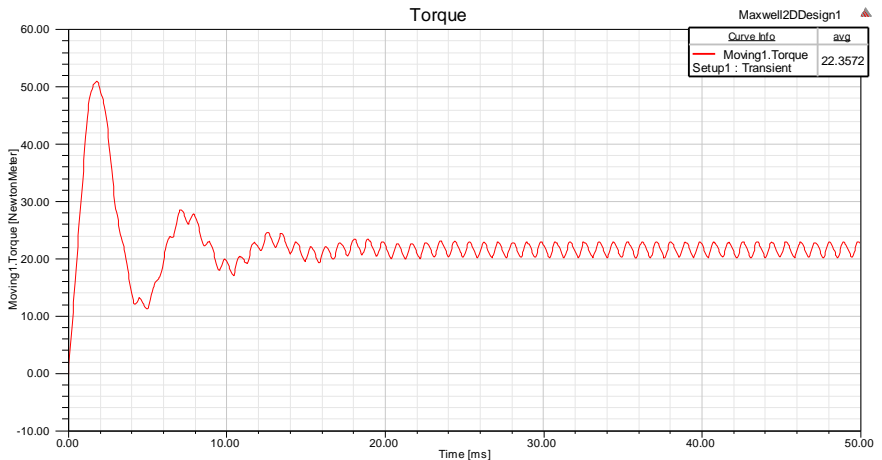
Keseluruhan data efisiensi *adjust-speed synchronous machine* ditunjukkan pada gambar 4.17, gambar tersebut memberikan informasi bahwa memperkecil *air gap* dengan tujuan untuk meningkatkan torsi akan berdampak pada efisiensi *adjust-speed synchronous machine*.

Air Gap vs Efisiensi Motor



Gambar 4. 17 Perbandingan Efisiensi *adjust-speed synchronous machine* dengan variasi *air gap*

Validasi untuk efisiensi *synchronous machine*, dilakukan dengan memindahkan simulasi *adjust-speed synchronous machine* ke 2D *transient* analisis untuk melihat torsi maksimum mesin melalui analisis *magnetic flux density* pada mode simulasi tersebut. Hasil simulasi pada gambar 4.18 dengan *air gap* 1 mm menunjukkan torsi maksimum dari *synchronous machine* sebesar 22.357 Nm.

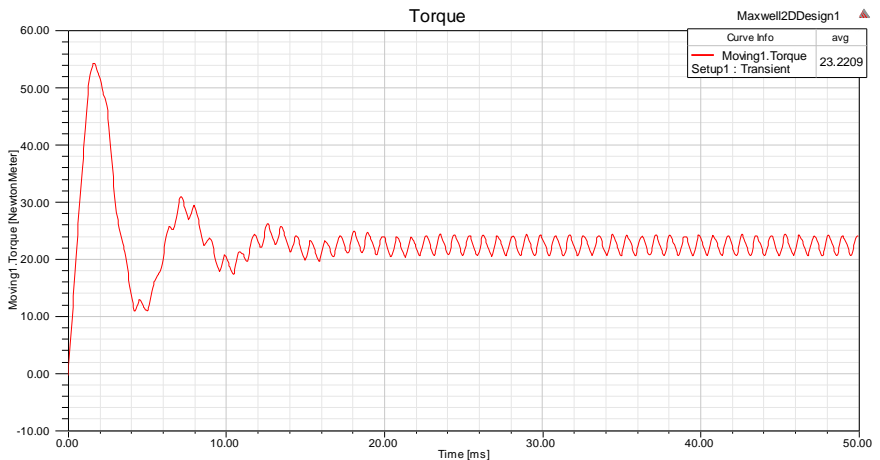


Gambar 4. 18 Torsi rata-rata *synchronous machine* dengan *air gap* 1 mm

Dengan kecepatan putar 500 rpm maka daya *output* yang dihasilkan adalah sebesar 1170.60 W, dengan asumsi efisiensi 100% maka daya input sama dengan daya output. Pada simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) untuk pengujian *air gap*, daya *output synchronous machine* yang dibutuhkan diatur pada 1000 W dan kecepatan putar 500 rpm dari dua data batasan masalah

tersebut. Berdasarkan kedua data daya tersebut efisiensi *synchronous machine* untuk pengujian ini adalah sebesar 85.42%.

Pada gambar 4.19 menunjukkan hasil simulasi 2D transient analisis dengan air gap 0.5 mm pada *adjust-speed synchronous machine*. Hasil simulasi menunjukkan torsi maksimum *synchronous machine* pada 23.22 Nm. Menggunakan asumsi yang sama dengan analisis *synchronous machine* pada air gap 1 mm, maka daya *input* yang dibutuhkan adalah sebesar 1215.79 W.



Gambar 4. 19 Torsi rata-rata *synchronous machine* dengan air gap 0.5 mm

Berdasar pada data daya *input* hasil simulai 2D transient analisis untuk *synchronous machine* dan daya *output* yang dibutuhkan untuk pengujian air gap *Pseudo Direct-Drive* (PDD), maka efisiensi *synchronous machine* untuk pengujian ini berkisar pada 82.25%.

Efisiensi *synchronous machine* menunjukkan penurunan jika jarak celah udara / *air gap* antara *winding* dan *outer rotor* pada simulasi *Pseudo Direct-Drive* (PDD) termasuk kedalam variabel yang divariasikan. Hasil simulasi dan analisis menggunakan mode simulasi 2D transient analisis dan hasil simulasi RMxprt menunjukkan hasil efisiensi *synchronous machine* akan menurun jika *air gap* pada rotor dan *winding* masuk pada variabel yang divariasikan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yang penting pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi pengaruh *air gap* pada *magneic planetary gear* menunjukkan torsi akan meningkat jika *air gap* antar *pole* diperkecil. Hasil simulasi 2D *transient* menunjukkan nilai torsi terbesar pada *air gap* 0.5 mm dengan nilai torsi 105.89 Nm hingga 130 Nm, dimana hasil untuk simulasi *magneic planetary gear* dengan *air gap* 1 mm adalah 87.5 Nm, dan hasil simulasi untuk *air gap* 2 mm adalah 50.38 Nm. Nilai torsi akan meningkat seiring dengan perubahan volume antar *pole* akibat celah udara / *air gap* yang diperkecil. Peningkatan torsi tersebut diakibatkan oleh nilai *magnetic energy* yang besar pada *air gap* yang kecil, yang berlandaskan pada konsep landasan teori menggunakan metode *co-energy*. Hasil simulasi *magnetostatic* menunjukkan kesesuaian dengan konsep dari metode *co-energy*, dimana nilai *magnetic energy* terbesar pada *air gap* 0.5 mm sebesar 39.8 J, *air gap* 1 mm sebesar 37.1 J, dan *air gap* 2 mm sebesar 33.5 J.

2. Penelitian pada *Pseudo Direct-Drive* dengan metode simulasi menggunakan RMxprt dan 2D *transient* yang memodifikasi *magnetic planetary gear* menjadi *Pseudo Direct-Drive*. Konsep sistem *Pseudo Direct-Drive* adalah merubah kecepatan putar dan torsi *output* dengan menambahkan *input* baru pada *magnetic planetary gear* melalui *winding* yang diletakan pada *outer rotor*. Hasil simulasi *magnetic planetary gear* tanpa *winding* menghasilkan torsi *output* sebesar 104.9 Nm dengan input 1000 rpm, dengan menambahkan sistem *winding* pada *magnetic planetary gear* yang membuat sistem memiliki dua *input* dengan kecepatan putar masing-masing adalah 1000 rpm, dan 500 rpm menghasilkan torsi *output* sebesar 81.55 Nm pada konfigurasi *air gap* 1 mm.
3. Pada penelitian pengaruh *air gap* terhadap torsi dari *Pseudo Direct-Drive* menunjukan fenomena yang sama dengan *magnetic planetary gear*. Torsi *Pseudo Direct-Drive* meningkat seiring dengan jarak celah udara / *air gap* yang diperkecil. Hasil pengujian dengan metode simulasi 2D *transient* menunjukan nilai torsi terbesar pada *air gap* 0.5 mm dengan torsi *output* rata-rata sebesar 109.84 Nm, torsi rata-rata pada *air gap* 1 mm dan 1.5 mm masing masing adalah 81.55 Nm, dan 60.05 Nm. Meningkatkan *air gap* pada *Pseudo Direct-Drive* memiliki dampak lain yang berhubungan dengan daya yang dibutuhkan motor untuk menggerakkan *input* 2 (*outer rotor*), dimana efisiensi motor akan menurun jika *air gap* diperkecil.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut adalah saran yang dapat penulis rangkum :

1. *Software Ansoft Maxwell* memiliki keterbatasan dalam mesimulasikan *Pseudo Direct-Drive*, yang mana simulasi hanya bisa dilakukan pada mode 2D. Kelemahan lain adalah pada simulasi tersebut pengaturan *motion setup* hanya dimungkinkan untuk arah putaran global Z positif. Penelitian menggunakan software tersebut menjadi sangat terbatas mengingat untuk menaikan torsi *output* pada *Pseudo Direct-Drive* membutuhkan pengaturan *motion setup* untuk memutar salah satu *input* pada koordinat glabal Z negatif. Penulis menyarankan beberapa software FEM *elektromagnetic* yang bisa digunakan diantaranya Opera FEA, dan MagNet dari Infolytica, namun kedua *software* tersebut membutuhkan akses *full version* untuk dapat melakukan analisis pada *Pseudo Direct-Drive*.
2. Metode penelitian lain yang dapat dikembangkan adalah melalui studi eksperimen dengan membuat *prototype* sistem.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUTSAKA

1. **Sadra, Mousavi.** 2015, *Design of New Type High Efficiency Magnetic Gear*. Istanbul Technical University.
2. **Atallah, K.; Mezani, S.; Rens, J.; Howe, D.** 2008, *A Novel "Pseudo" Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11.
3. **Ho, S.L.; Niu, S.; and Fu, W.N.** 2011, *Transient Analysis of a Magnetic Gear Integrated Brushless Permanent Magnet Machine Using Circuit-Field-Motion Coupled Time-Stepping Finite Element Method*. China User Conference Excellent Paper
4. **Chau, K.T.; Jian, L** 2009, *A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation*
5. **Gieras, Jacek F.** 2010, *Permanent Magnet Motor Technology Design and Application 3rd* : Taylor and Francis Group. United States of America.
6. **Coey, J. M. D.** 2002, *Permanet Magnet Applications*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 248, 441–456.
7. **Jelaska, D.** 2012, *Gears And Gear Drives*. United Kingdom : John Wiley & Sons.
8. **Learn Engineering.** "Understanding Planetary Gear Set". YouTube. YouTube, Tanggal akses 28 maret 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=ARd-Om2VyiE>.
9. **Thompson, Dixie L.** 2004, *Mechanical Design and Analysis of a Discrete Variabel Transmission System for Transmission Based Actuators*. University of Tennessee, Knoxville
10. **Gouda, E.; Mezani, S.; Baghli, L.; and Rezzoug, A.** 2011, *Comparative Study Between Mechanical and*

Magnetic Planetary Gears. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47.

11. **Atallah, K. and Howe, D.** 2001, *A novel high-performance magnetic gear. Part.1*, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4.
12. **Chau, K.T.; Jian, L.** 2010, *A Coaxial Magnetic Gear With Halbach Permanent-Magnet Arrays. IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 25, No. 2.
13. **Jorgensen, Frank Thorleif.** 2010. *Design and Construction of Permanent Magnet Gear*. Denmark: Aalborg University.
14. **Niguchi, N.; Hirata, K.; Muramatsu, M.; and Hayakawa.** 2010, *Transmission Torque Characteristics in a Magnetic Gear. International Conference on Electrical Machines - ICEM*, Rome.
15. **Magnomatics®.** *The MAGSPLIT® Hybrid Transmission*. Tanggal akses 30 Maret 2018. <http://www.magnomatics.com/pages/media/articles-in-the-press.htm#>.
16. **HIRATA Laboratory.** *Magnetic Gear With Variabel Gear Ratio*. Tanggal akses 1 April 2018. http://www.amp.ams.eng.osaka-u.ac.jp/research/p_gear/cvt2011.pdf
17. **Nikishkov, G.P.** 2004, *Intoduction To Finite Element Method* : Lecture Notes. University of Aizu, Aizu-Wakamatsu.
18. **Norton, Robert L.** 1999, *Design of machinery*. Singapore : WCB/McGrw-Hill.
19. **Neves, C.G.C., Filho, A.F.F.** 2017, *Pseudo Direct Drive Simulation and Analysis*. Universidade Federal de Pelotas, Brazil

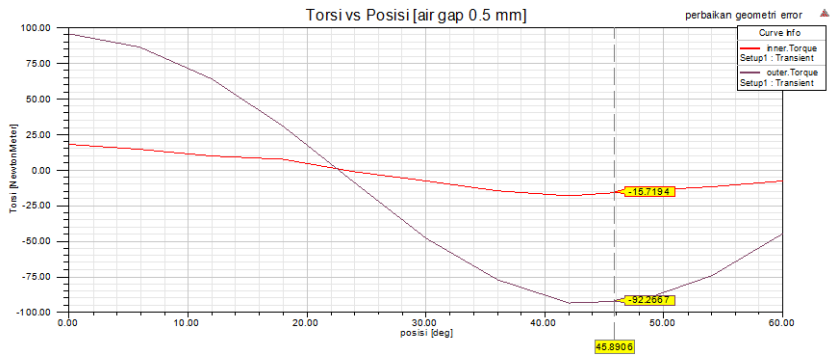
20. **Kurth, Franz.** 2012, *Efficiency Determination and Synthesis of Complex-Compound Planetary Gear Transmissions*. German : Munchen University.
21. **Raj, Y.; Nair, V.S.; Varghese, L.K.; Vincent, M.; and Wilson D.** 2016, *Magnetic Gearing System*. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, Volume 2, Issue 12.
22. **Maruganandam, G.; Jayakumar, K.S.; S., Hariharan; and E., Joshua.** 2012, *Torque Analysis of Perpendicular Magnetic Gear with High Gear Ratio*. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 3, Issue 6.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

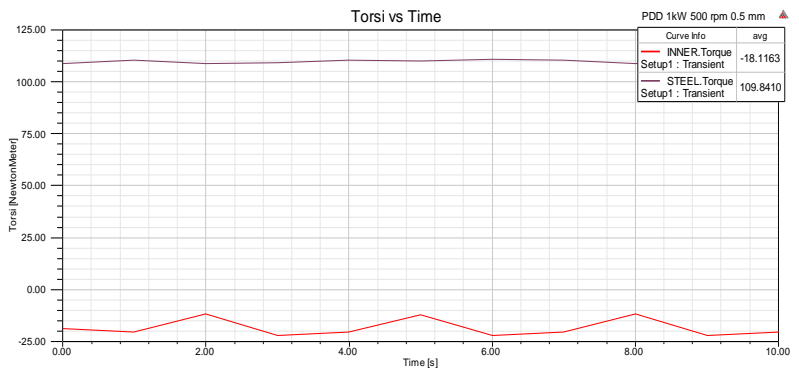
1. Pengaruh *Air Gap* Terhadap Torsi *Magnetic Planetary Gear*

A. Hasil Simulasi Perbaikan *Geometry Error* *Magnetic Planetary Gear* *Air Gap* 0.5 mm

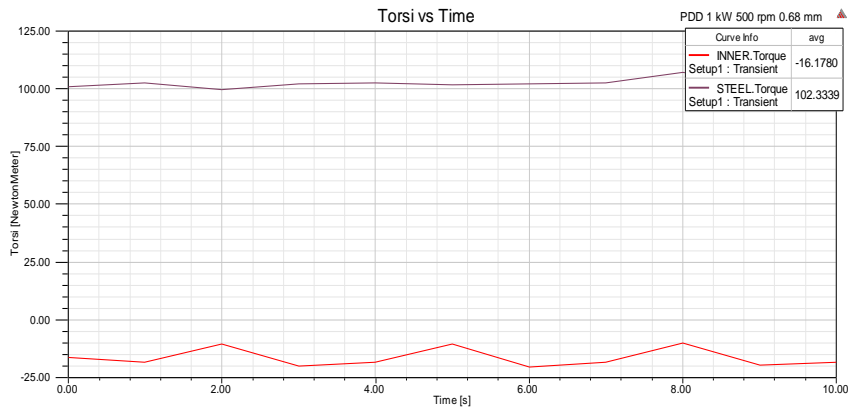


2. Pengaruh *Air Gap* Terhadap Torsi *Pseudo Direct-Drive*

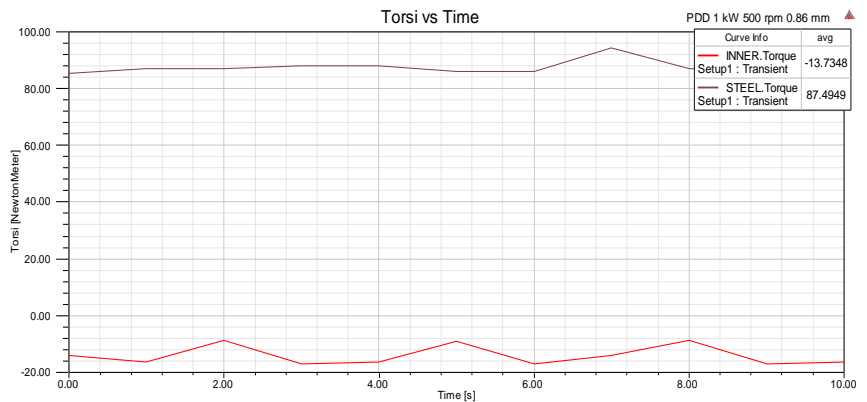
A. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan *Air Gap* 0.5 mm



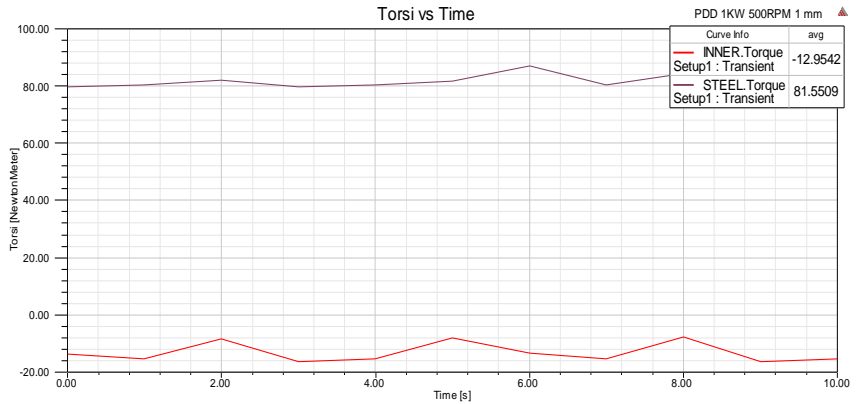
B. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan Air Gap 0.68 mm



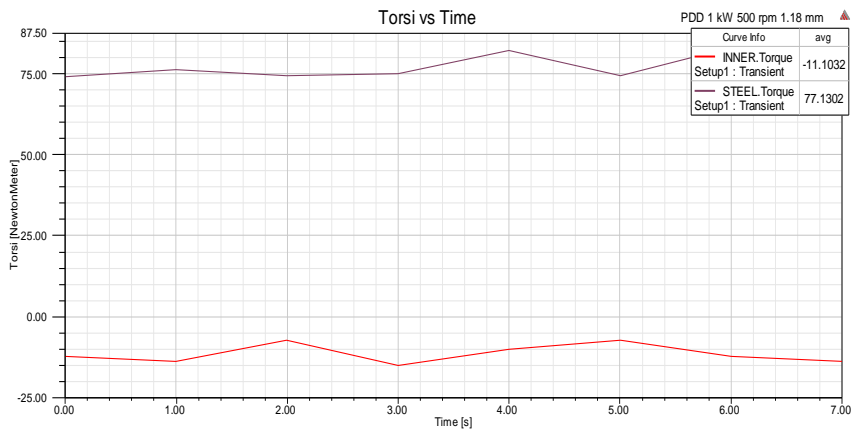
C. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan Air Gap 0.86 mm



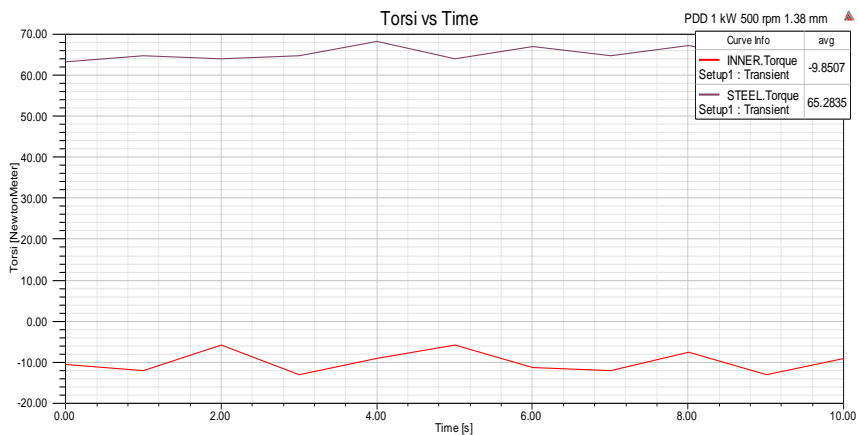
D. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan Air Gap 1 mm



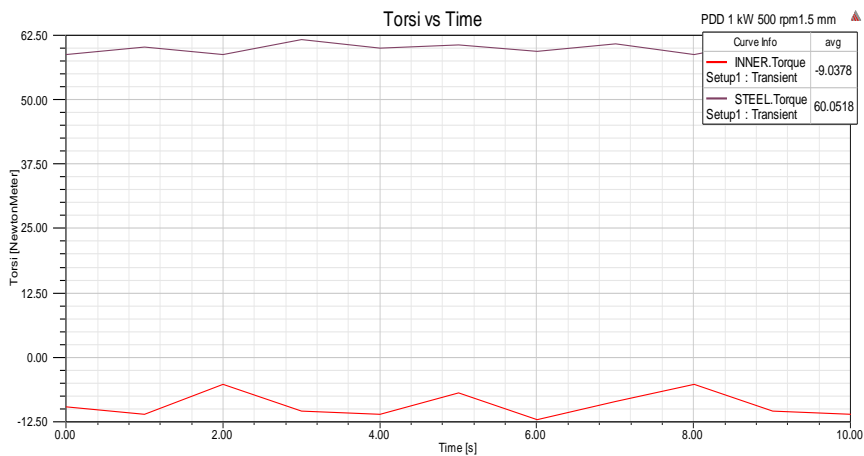
E. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan Air Gap 1.18 mm



F. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan Air Gap 1.38 mm



G. Hasil Simulasi *Pseudo Direct-Drive* Dengan Air Gap 1.5 mm



3. Pengaruh Air Gap Terhadap Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*

A. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, air gap 0.5 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2033750	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	98.8744	W	
9	Armature Copper Loss	38.6548	W	
10	Total Loss	138.779	W	
11	Output Power	1000.24	W	
12	Input Power	1139.02	W	
13	Efficiency	87.8159	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1031	NewtonMeter	
16	Torque Angle	17.3331	deg	
17	Maximum Output Power	3231.13	W	

B. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, air gap 0.68 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2135770	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	87.5539	W	
9	Armature Copper Loss	42.6301	W	
10	Total Loss	131.434	W	
11	Output Power	1000.15	W	
12	Input Power	1131.58	W	
13	Efficiency	88.385	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1015	NewtonMeter	
16	Torque Angle	18.3494	deg	
17	Maximum Output Power	3059.88	W	

C. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, *air gap* 0.86 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2235490	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	77.874	W	
9	Armature Copper Loss	46.7038	W	
10	Total Loss	125.828	W	
11	Output Power	1000.35	W	
12	Input Power	1126.18	W	
13	Efficiency	88.827	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1053	NewtonMeter	
16	Torque Angle	19.4633	deg	
17	Maximum Output Power	2894.3	W	

D. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, *air gap* 1 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2309970	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	71.3687	W	
9	Armature Copper Loss	49.8678	W	
10	Total Loss	122.486	W	
11	Output Power	1000.22	W	
12	Input Power	1122.71	W	
13	Efficiency	89.0901	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1029	NewtonMeter	
16	Torque Angle	20.3772	deg	
17	Maximum Output Power	2771.56	W	

E. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, air gap 1.18 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2401250	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	64.1428	W	
9	Armature Copper Loss	53.8868	W	
10	Total Loss	119.28	W	
11	Output Power	1000.23	W	
12	Input Power	1119.51	W	
13	Efficiency	89.3454	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1031	NewtonMeter	
16	Torque Angle	21.6167	deg	
17	Maximum Output Power	2622.64	W	

F. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, air gap 1.38 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2496620	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	57.3692	W	
9	Armature Copper Loss	58.2521	W	
10	Total Loss	116.871	W	
11	Output Power	1000.29	W	
12	Input Power	1117.17	W	
13	Efficiency	89.5386	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.1042	NewtonMeter	
16	Torque Angle	23.0719	deg	
17	Maximum Output Power	2468.94	W	

G. Hasil Simulasi Pengaruh *Air Gap* Pada Efisiensi *Adjust-Speed Synchronous Machine*, *air gap* 1.5 mm

	Name	Value	Units	Description
6	Armature Current Density	2551050	A_per_m2	
7	Frictional and Windage Loss	1.25	W	
8	Iron-Core Loss	53.8131	W	
9	Armature Copper Loss	60.8197	W	
10	Total Loss	115.883	W	
11	Output Power	1000.01	W	
12	Input Power	1115.89	W	
13	Efficiency	89.6152	%	
14	Synchronous Speed	500	rpm	
15	Rated Torque	19.0988	NewtonMeter	
16	Torque Angle	23.9803	deg	
17	Maximum Output Power	2381.95	W	

BIODATA PENULIS



Ikhtiar Adhi Nugroho dilahirkan di Sukoharjo, 26 November 1992 merupakan anak pertama dari orangtua bernama Bapak Mulyadi dan Ibu Kasilah. Jenjang pendidikan terakhir yang ditempuh penulis adalah D3 teknik Perawatan dan Perbaikan Mesin, Akademi Teknik Soroako (ATS), Soroako, Sulawesi Selatan, dan Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Apabila ada pertanyaan berkaitan tugas akhir ini penulis dapat dihubungi lewat email: ikhtiar.a.nugroho02@gmail.com